



LA
CHALEUR
CONSIDÉRÉE
COMME UN MODE DE MOUVEMENT

OUVRAGES DE M. L'ABBÉ MOIGNO

IMPOSSIBILITÉ DU NOMBRE INFINI ET SES CONSÉQUENCES. Démonstration mathématique du dogme de la création et de la récente apparition de l'homme sur la terre. In-8° br. . . . . 0 fr. 50

PRINCIPES FONDAMENTAUX, d'après lesquels doivent se résoudre les deux grandes questions : 1° des rapports de l'Église et de l'État ; 2° de la liberté et de l'organisation de l'enseignement. 1 vol. in-8°. . . . 1 fr. 50

LEÇONS DE CALCUL DES VARIATIONS, rédigées en collaboration avec M. LINDELÖF. 1 vol. in-8°. . . . . 6 fr.

TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE. Histoire, théorie et instruments. 1 vol. in-8° avec atlas. . . . . 15 fr.

LA CLEF DE LA SCIENCE, ou les phénomènes de tous les jours expliqués par le docteur E. C. BREWER, membre de l'Université de Cambridge, du collége des Précepteurs de Londres, etc., 4e édition, revue et augmentée par M. l'abbé MOIGNO. 1 vol. in-18 jésus (*sous presse*).

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1

LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

COMME UN MODE DE MOUVEMENT

COURS EN DOUZE LEÇONS

PROFESSÉES A L'INSTITUTION ROYALE DE LA GRANDE-BRETAGNE

PAR

JOHN TYNDALL

de la Société royale de Londres, professeur de physique à Royal Institution

OUVRAGE TRADUIT DE L'ANGLAIS

PAR

M. L'ABBÉ F. M. MOIGNO



PARIS

ÉTIENNE GIRAUD, LIBRAIRE-ÉDITEUR

20, RUE SAINT-SULPICE, 20

1864

PRÉFACE

Dans ces leçons j'ai fait tous mes efforts pour rendre accessibles aux personnes d'intelligence et d'instruction ordinaires les éléments ou rudiments d'une *philosophie nouvelle*. Les sept premières leçons traitent de la *chaleur thermométrique*, de sa génération, de sa transformation en puissance mécanique ; de la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur ; de la réduction de la chaleur à un mouvement moléculaire ; de l'application de cette conception à l'explication des formes solide, liquide et gazeuse de la matière ; de la dilatation et de la combustion ; de la chaleur spécifique et latente ; de la conductibilité calorifique.

Les cinq dernières leçons traitent de la *chaleur rayonnante*, du milieu intrastellaire, et de la propagation du mouvement à travers ce milieu ; des rapports de la chaleur

rayonnante avec la matière ordinaire dans ses divers états d'agrégation; des radiations terrestre, lunaire et solaire; de la constitution du soleil; des sources possibles de son énergie; des relations de cette énergie avec les forces terrestres, avec la vie végétale et animale.

Mon but, en m'élevant au niveau de ces questions, a été de partir d'une base tellement élémentaire, que je puisse être compris de toute personne douée de quelque imagination et capable de quelques efforts d'attention.

Lorsque des remarques additionnelles ou des citations m'ont paru de nature à rendre plus exacte et plus complète l'intelligence du sujet traité, je les ai jointes à la leçon sous forme d'appendices.

Les noms des fondateurs de cette nouvelle philosophie sont déjà familiers au public scientifique. Au premier rang des expérimentateurs qui ont contribué à l'établir, il faut placer Rumfort, Davy, Faraday et Joule. Ses principaux théoriciens, rangés par ordre alphabétique, sont : Clausius, Helmholtz, Holtzman, Kirchhoff, Mayer, Rankine, Regnault, Seguin et Thomson. Les lecteurs qui en éprouveront le désir devront chercher dans les mémoires de ces hommes éminents une connaissance plus profonde de la matière. M. Verdet a publié récemment sur cette même théorie deux leçons qui mettent pleinement en évidence la très-grande érudition qui le distingue. Il serait superflu de rappeler aux lecteurs anglais le nom si connu et l'ouvrage si estimé de M. Grove.

J'ai appelé la physique de la chaleur une *philosophie*

nouvelle, sans vouloir, bien entendu, restreindre ce mot philosophie à la question de la chaleur. En réalité, cette restriction est impossible; car la connexion de l'agent appelé chaleur avec toutes les autres énergies ou forces de la nature est telle que, quand on l'a bien dominé, on domine en même temps tout le reste. Déjà même nous pouvons entrevoir, quoique dans un lointain quelque peu obscur, que les progrès accomplis ouvriront des issues nouvelles, enfanteront des progrès nouveaux que ne pouvaient pas même prévoir ceux dont l'habileté et le génie ont jeté les bases de nos connaissances actuelles.

Dans une leçon sur l'influence de l'histoire des sciences, faite à Royal Institution, M. le docteur Whewell a montré que chaque grand progrès accompli dans le domaine de l'intelligence a été précédé de quelque grande découverte, ou d'un groupe de découvertes scientifiques. Si la coïncidence signalée par l'illustre écrivain est une loi de la nature, on peut affirmer sans crainte que les vues sur la connexion et la conversion mutuelle des forces naturelles, organiques et inorganiques, vitales et physiques que nous avons vues surgir, et qui surgiront plus encore de la recherche des lois et des rapports de la chaleur, exerceront une grande influence sur l'éducation intellectuelle des âges à venir.

Dans l'étude de la nature, on voit en jeu deux éléments appartenant, respectivement, l'un au monde des sens et l'autre au monde de la pensée. Nous observons un fait et nous cherchons à le rapporter à une loi; nous partons d'une loi et nous cherchons à mettre le fait sous sa depen-

dance. L'un est la théorie, l'autre est l'expérience, qui, appliquées aux buts ordinaires de la vie, deviennent la science pratique. Rien n'est plus apte à faire ressortir la réaction mutuelle et féconde de ces deux éléments que l'histoire du sujet que nous traitons. Si la machine à vapeur n'avait pas été inventée, nous serions certainement restés bien au-dessous du niveau que nous avons atteint. Les grands effets que la chaleur a produits par l'intermédiaire de la machine à vapeur ont excité l'enthousiasme des esprits penseurs, et les ont amenés à se demander quel est l'agent merveilleux par le moyen duquel nous parvenons à remplacer la force des courants d'air et des courants d'eau, des chevaux et de l'homme? La chaleur produit de la force mécanique et la force mécanique produit de la chaleur ; il faut donc que des qualités communes unissent cet agent aux formes ordinaires du pouvoir mécanique. Cette relation une fois établie, l'intelligence généralisatrice peut passer d'un seul bond aux autres énergies de l'univers ; et elle arrive à saisir le principe qui les unit. C'est ainsi que le triomphe de l'habileté pratique a déterminé le développement des idées philosophiques. C'est ainsi que par l'action réciproque de la pensée et du fait, de la vérité conçue et de la vérité mise à exécution, nous avons fait notre science ce qu'elle est, le plus grand progrès des temps modernes ; quoiqu'on n'ait fait encore jusqu'ici que très-imparfaitement appel à cette source si riche de puissance individuelle et nationale.

On continue à révoquer en doute les services qu'elle

peut rendre dans la sphère du développement de l'intelligence ; et cependant lorsqu'elle sera convenablement organisée, on doit en attendre, dans cette sphère, une révolution plus bienfaisante encore que celle qui a marqué son application au monde matériel. Bien certainement les hommes dont la noble vocation est d'organiser l'enseignement en Angleterre ne pourraient pas laisser grandir autour d'eux ce pouvoir gigantesque sans désirer bientôt jouir de ses avantages pratiques. La science n'a pas besoin de leur protection, mais elle souhaite leur amitié et d'être avec eux dans des termes honorables; elle demande à tendre avec eux à la grande fin de toute éducation, l'amélioration des conditions humaines. En continuant à repousser la main qui leur est offerte par la science, ils courent risque de faire naître un conflit dont le résultat est connu à l'avance. La science doit grandir ; son développement est aussi nécessaire et aussi irrésistible que le mouvement des marées ou le flux incessant du Gulf-Stream. C'est une des phases de l'énergie de la nature, et comme telle, il saura se faire reconnaître forcément, sinon accepter comme allié fidèle par ceux qui maintenant décrient son influence et découragent ses progrès.

PRÉFACE DU TRADUCTEUR

Habitué depuis plusieurs années à admirer l'esprit, les méthodes et l'ardeur scientifiques de mon ami M. le docteur et professeur Tyndall, j'attendais avec impatience l'apparition de ses douze leçons sur *la Chaleur considérée comme un mode de mouvement* ; et je fus bien heureux le jour où j'appris que le premier exemplaire de son beau volume, à destination de la France, venait d'être mis à mon adresse.

Initié, j'oserai presque dire voué à la théorie dynamique de la chaleur et à la brillante synthèse que M. Tyndall s'était donné pour mission de populariser, je lus ces leçons avec avidité, et, tout aussitôt, elles me séduisirent. Il me semblait impossible de joindre à une plus grande netteté d'élocution plus d'exactitude dans l'exposition, d'esprit dans la discussion, de finesse dans la réfutation, de dextérité enfin dans l'expérimentation. Jamais ouvrage de physique plus parfait ne m'était tombé sous la main ;

et je pris immédiatement la résolution de le traduire, empressé d'offrir un modèle aussi accompli aux professeurs de notre chère France.

Ai-je bien rempli ma tâche? Cette version est-elle ce qu'elle devait être? Rend-elle parfaitement l'original? Le fera-t-elle apprécier et aimer à sa juste valeur? Je l'espère, mais c'est à mes lecteurs à prononcer. Ma traduction du savant livre de M. Grove, *la Corrélation des forces physiques*, est très-généralement estimée; quelques-uns, cependant, l'ont trouvée trop littérale et trop anglaise. J'ai voulu, cette fois, être aussi parfaitement exact, mais plus français.

M. Tyndall a dit, sans y prendre assez garde, dans sa lettre à M. Joule, page 444 de ce volume, qu'il avait chargé un sténographe de saisir au vol ses leçons orales. Prenant ces paroles trop à la lettre, un critique parisien semble vouloir reprocher à mon savant ami de s'être présenté au public dans le déshabillé d'une improvisation sténographiée. Cette disposition d'esprit m'a d'autant plus surpris que le livre de *la Chaleur considérée comme un mode de mouvement*, m'était apparu plus parfait encore dans la forme que dans le fond, extrêmement étudié et très-littéraire. Je savais que, mécontent de la reproduction de ses trois premières leçons, M. Tyndall avait remercié le sténographe, et que, pour les livrer à l'impression, il avait rédigé à nouveau et écrit de sa propre main ses douze leçons, avec ardeur et persévérance. Je savais que le fini de sa rédaction et l'élégance de son style avaient vivement frappé les hommes les plus éminents

de l'Angleterre, de l'Allemagne et de l'Amérique. J'avais lu, par exemple, dans les deux journaux les plus estimés des États-Unis, l'*American journal of science*, et le *Scientific American*, ces deux appréciations que je me fais un devoir de rappeler :

« A toute l'habileté qui a fait de Faraday le grand maître de la science expérimentale en Angleterre, M. le professeur Tyndall, joint une éducation littéraire très-complète ; il a pu ainsi revêtir sa philosophie de toutes les grâces de l'éloquence et de tout le fini d'une diction supérieure. »

« Ce livre est écrit dans un style charmant, et c'est sans contredit la plus précieuse contribution à la littérature scientifique publiée depuis plusieurs années. »

Je crois inutile de recommander plus particulièrement à l'attention du lecteur telle ou telle série d'expériences, telle ou telle théorie, car un des caractères les plus saillants de l'œuvre de M. Tyndall, c'est d'être partout également pleine d'intérêt ; mais je termine en signalant une imperfection, en exprimant un regret, en formulant un vœu ou un espoir.

L'imperfection est une confusion trop sensible et trop fréquente de ces mots : *particules*, *dernières particules*, *molécules*, *atomes*, que j'ai pris tant de peine à distinguer, et qui ont des significations si différentes. Pour moi, et je voudrais qu'il en fût ainsi pour M. Tyndall, la particule est formée de molécules, et la molécule est formée d'atomes, êtres simples, sans étendue, purs centres de forces, très-probablement identiques ou les mêmes dans tous les

corps. Le mouvement qui constitue la chaleur est appelé tour à tour : particulaire, moléculaire, atomique : il ne peut cependant pas être à la fois l'une et l'autre de ces trois sortes de mouvement. Quel est-il ? Atomique, sans aucun doute ; tandis que le son serait un mouvement moléculaire. Mais comment le concevoir en lui-même et le distinguer du mouvement qui constitue la lumière ?

Le regret est de voir que deux physiciens aussi expérimentés et aussi illustres que MM. Magnus et Tyndall, n'aient pas pu se mettre d'accord sur un point de fait très-saillant, et pourtant affirmé par l'un, nié par l'autre. Hier encore, M. Magnus, publiait dans les annales de Poggendorff, un nouvel article dans lequel il maintient, après avoir répété avec le plus grand soin ses expériences, que, pour lui, la différence entre les absorptions pour la chaleur de l'air sec et de l'air humide, est tout à fait insignifiante, tandis que M. Tyndall l'a vue énorme. Pour moi, M. Tyndall est dans le vrai, M. Magnus est dans l'erreur ; et j'espère qu'un très-prochain avenir confirmera pleinement mon opinion.

M. Tyndall, dans le cours de ses leçons, fait un usage incessant et vraiment admirable de la lumière électrique comme moyen souverainement puissant et facile de rendre visible au plus immense auditoire, par projection très-agrandie sur un écran, les phénomènes les plus délicats. Il me permettra de rappeler qu'avec M. Soleil père, j'ai eu l'initiative de ce mode d'enseignement ; qu'avec M. Duboscq, gendre de M. Soleil, je l'ai inauguré, ou importé en Angleterre. Cela posé, mon vœu est qu'il me soit bientôt

donné de refaire expérimentalement, avec cette même lumière électrique, dans un grand amphithéâtre, les douze leçons que j'ai traduites avec tant de bonheur. Mon apostolat, alors, aura plus de retentissement et d'efficacité, j'aurai mieux mérité de la science, dont les progrès me sont si chers, et de l'ami dont j'ai le triomphe tant à cœur.

M. l'abbé Raillard a bien voulu ébaucher cette traduction, qu'il veuille bien accepter mes remercîments sincères; il y a longtemps qu'il me donne chaque jour de nouvelles preuves de son attachement cordial ; ma reconnaissance ne laissera rien à désirer à sa bonne amitié.

M. Tyndall, qui comprend parfaitement notre langue, a bien voulu revoir mes dernières épreuves; et j'ai fait toutes les corrections qu'il a désirées. Il en résulte, et je m'en félicite, que l'édition française est actuellement plus parfaite que l'édition anglaise, déjà presque entièrement épuisée.

F. MOIGNO.

SOMMAIRE DES CHAPITRES

SOMMAIRE DES CHAPITRES

LEÇON PREMIÈRE

APPENDICE A LA LEÇON I

LEÇON II

APPENDICE A LA LEÇON II

LEÇON III

APPENDICE A LA LEÇON III

LEÇON IV

APPENDICE A LA LEÇON IV

LEÇON V

LEÇON VI

APPENDICE A LA LEÇON VI

LEÇON VII

LEÇON VIII

APPENDICE A LA LEÇON VIII

LEÇON IX

APPENDICE A LA LEÇON IX

LEÇON X

APPENDICE A LA LEÇON X

LEÇON XI

APPENDICE A LA LEÇON XI

LEÇON XII

APPENDICE A LA LEÇON XII

LA CHALEUR

CONSIDÉRÉE

COMME UNE FORME DE MOUVEMENT

LEÇON I

(23 JANVIER, 1862)

Instruments. — Génération de chaleur par action mecanique. — Consomption de chaleur dans la production du travail.

Appendice. — Notes sur la pile thermo-électrique et le galvanomètre.

Le caractère principal des sciences naturelles est leur accroissement incessant; chaque fait est vital, et chaque découverte nouvelle est un point de départ pour de plus amples conquêtes; Ces sciences semblent ainsi destinées à progresser toujours, tant que les phénomènes et les lois de l'univers matériel ne seront pas entièrement saisis par l'entendement humain. Mais, quoique chacune des branches des sciences naturelles ait ajouté à son fonds dans une proportion qu'on n'aurait pas pu prévoir au début, aucune ne s'est autant développée dans ces derniers temps que celle qui, dans ces leçons, devra fixer notre attention. Jusqu'ici, dans les traités élémentaires, on a fait à peine allusion aux idées modernes sur la chaleur; et l'enseignement public sur ce point est bien au-dessous du niveau qu'il doit atteindre. Mais cette réserve était naturelle, car la matière est encore quelque peu embrouillée; et, en l'abordant, nous devons nous attendre à des difficultés sérieuses, dont nous pouvons dire, toutefois, que, dans le

domaine entier des sciences, il n'en est pas qui méritent plus d'être surmontées, et dont le triomphe récompense mieux des peines qu'on s'est données. Car, en dominant les lois et les rapports de la chaleur, nous rendrons évidente à notre esprit la dépendance mutuelle de toutes les forces naturelles en général. Mettons-nous donc à l'œuvre avec *cœur* et *espérance;* familiarisons-nous avec les faits et les idées les plus modernes relativement à cet agent qui pénètre tout; puis cherchons avec diligence les chaînons de la loi qui lie entre eux les faits et donne de l'unité à leurs manifestations les plus diverses. Si nous réussissons, nous donnerons satisfaction, dans un degré inconnu jusqu'ici, à cet amour de l'ordre et du beau qui, j'en suis persuadé, est implanté dans le cœur de chacun de mes lecteurs. Des hauteurs auxquelles nous aspirons nous aurons, de l'ensemble de la nature, une vue incomparablement plus claire que celle à laquelle nous pourrions atteindre, si, tandis que je me fais votre guide dans la région où nous allons entrer, je me tenais au niveau le plus bas et dans les sentiers déjà battus.

Mon premier devoir est de vous faire connaître quelques-uns des instruments que j'ai l'intention d'employer dans l'étude des phénomènes. J'ai dû, avant tout, imaginer des moyens nouveaux de rendre visibles à tous les indications de chaleur et de froid, car les thermomètres ordinaires ne me serviraient à rien. Vous ne pourriez pas saisir leurs mouvements, et je tiens à ce que vous voyiez de vos yeux les faits sur lesquels se fonde la physique que nous avons à créer. Mon désir est de vous fournir tous les matériaux sur lesquels vous puissiez fonder un jugement indépendant; de vous mettre à même de raisonner comme je raisonne, si vous jugez que je sois dans le vrai; de me redresser si je m'égare, de me reprendre si vous trouvez que je ne traite pas loyalement mon sujet. Pour arriver sûrement à ces fins, j'ai donc été obligé d'abandonner l'emploi des thermomètres connus, et d'avoir recours au petit instrument AB (fig. 1), que vous voyez devant moi sur la table, et qu'on appelle *pile thermo-électrique*[1].

[1] Une courte description de la pile thermo-électrique est donnée dans l'appendice qui suit cette leçon.

Par le moyen de cet instrument, j'oblige la chaleur qu'il reçoit à engendrer un courant électrique ; or, vous savez, ou vous devez savoir, qu'un courant électrique a le pouvoir de faire dévier une aiguille aimantée, suspendue librement et parallèlement à la direction qu'il suit. J'ai placé devant vous une semblable aiguille *m n* (fig. 1), entourée d'un fil de cuivre recouvert de soie, dont

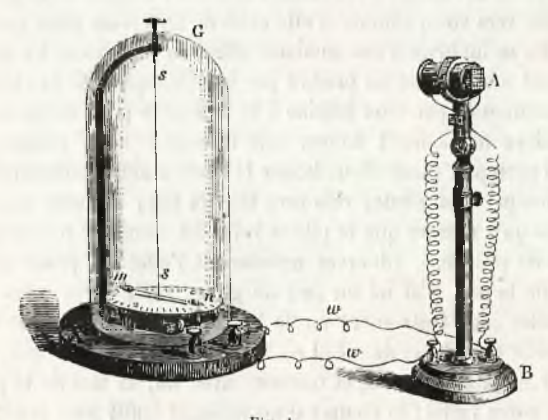


Fig. 1.

les extrémités, *w*, *w*, communiquent avec la pile thermo-électrique. L'aiguille est suspendue par un fil de cocon non tordu, et protégée par une cloche de verre, qui la met à l'abri des mouvements de l'air. J'ai fixé à l'une des extrémités de l'aiguille un morceau de papier rouge, à l'autre extrémité un morceau de papier bleu. Vous voyez, tous, ces morceaux de papier, et lorsque l'aiguille se meut, son mouvement peut être facilement aperçu des personnes de cette salle les plus éloignées[1].

En ce moment l'aiguille est tout à fait en repos, et regarde le point marqué zéro sur le cercle divisé, placé au-dessous d'elle. Ceci montre qu'il ne passe pas de courant. J'insuffle maintenant

[1] Dans la disposition actuelle, le galvanomètre ici décrit est placé sur un guéridon en face de la table du professeur, les fils *w*, *w*, étant assez longs pour atteindre de la table au guéridon. Pour une description plus complète du galvanomètre, voyez l'appendice de cette leçon.

mon haleine contre la face nue A de la pile; une seule bouffée d'air chaud suffira à mon dessein; observez l'effet. L'aiguille marche vivement et parcourt un arc de 90°. Elle serait allée plus loin si je n'avais pas mis une limite à son mouvement en fixant, près du bord, à 90°, une lame mince de cuivre. Prenez note du sens de la déviation; l'extrémité rouge de l'aiguille s'est portée de moi vers vous, comme si elle avait de l'aversion pour moi et qu'elle se fût prise d'une soudaine affection pour vous. Ce mouvement de l'aiguille est produit par la faible quantité de chaleur communiquée par mon haleine à la face de la pile; aucun thermomètre ne pourrait donner une indication aussi sensible et aussi prompte. Nous allons laisser la chaleur ainsi communiquée se dissiper elle-même; cela sera bientôt fait, et nous remarquons qu'à mesure que la pile se refroidit, l'aiguille revient à sa position première. Observez maintenant l'effet du *froid* sur la face de la pile. J'ai ici un peu de glace, mais je ne veux pas mouiller mon instrument en le touchant avec la glace. Je vais refroidir cette lame de métal en la plaçant sur la glace, puis essuyer le métal refroidi, et toucher, avec lui, la face de la pile. Vous voyez l'effet; le contact d'un moment suffit pour produire une prompte et énergique déviation de l'aiguille. Mais remarquez le sens de la déviation. Lorsque la pile était échauffée, l'extrémité rouge de l'aiguille se portait de moi vers vous; maintenant, ses sympathies sont inverses, et l'extrémité rouge se porte de vous vers moi. Vous voyez ainsi que le froid et le chaud forcent l'aiguille à se mouvoir dans des sens opposés. Le point important établi ici, c'est que du sens suivant lequel l'aiguille se meut nous pouvons conclure avec certitude si du froid ou de la chaleur ont été communiqués à la pile; et que l'énergie avec laquelle l'aiguille se meut, la promptitude avec laquelle elle est arrachée à sa position de repos, nous donnent une idée de la quantité relative de chaleur ou de froid que la pile reçoit dans les différents cas. Dans la leçon prochaine, j'exposerai comment nous pouvons exprimer en nombres ces quantités relatives de chaleur, avec une précision suffisante; mais, pour le moment, il nous suffit d'avoir une connaissance générale du mode d'action de notre instrument.

Mon désir, actuellement, est de rattacher la chaleur aux formes les plus familières de la force, et pour cela je vais, en premier lieu, essayer de vous faire faire provision de faits capables de vous éclairer sur la génération de la chaleur par les procédés mécaniques. J'ai placé, dans la chambre voisine, quelques morceaux de bois que mes aides vont m'apporter. Maintenant, pourquoi les ai-je placés là ? Tout simplement pour que je puisse faire mes expériences avec cette sincérité d'esprit et d'action que la science demande de ceux qui la cultivent. Je sais que la température de la chambre voisine est légèrement inférieure à la température de celle-ci ; et qu'ainsi le bois, qui est maintenant devant moi, est un peu plus froid que la face de la pile avec laquelle j'ai l'intention de rendre manifeste sa température. Faisons-en l'épreuve. Je place la face de la pile contre ce morceau de bois; l'extrémité rouge de l'aiguille se meut de vous vers moi, montrant, par conséquent, que le contact a refroidi la pile. Cela posé, je frotte avec précaution la face de la pile avec la surface du bois ; je dis « avec précaution, » parce que la pile est un instrument fragile, et qu'en la traitant brutalement on la détruirait; remarquons ce qui arrive. Le mouvement prompt et énergique de l'aiguille vers vous proclame que la face de la pile a été échauffée par ce léger frottement. L'aiguille, vous le voyez, va tout à fait à 90°, du côté opposé à celui vers lequel elle s'était portée avant qu'on eût frotté.

Ces expériences, qui mettent en évidence le développement de la chaleur par des moyens mécaniques, doivent être pour nous ce que les exercices sont pour un écolier. Afin de les fixer dans notre esprit, et de nous en rendre maîtres, nous allons les répéter et les varier de plusieurs manières. Je vous prie de me suivre dans mon entreprise. Voici un morceau plat de cuivre muni d'une tige; je prends dans mes doigts la tige, que j'enveloppe de flanelle froide, pour mieux défendre le cuivre de l'influence du contact de ma main plus chaude. Je place le cuivre en contact avec la face de ma pile; l'aiguille se meut, en montrant que le cuivre est froid. Je frotte maintenant le cuivre contre la surface de ce morceau froid de bois, et je l'applique de nouveau contre

ma pile; je le retire promptement, car il est si chaud, que si je le laissais en contact avec l'instrument, le courant engendré ferait heurter violemment mon aiguille contre les obstacles qui l'arrêtent; ce qui, probablement, modifierait son aimantation. Vous voyez la forte déviation que le contact d'un seul instant peut produire. Je me le rappelle, quand j'étais écolier, je me suis souvent brûlé la main au contact d'un bouton de cuivre que j'avais énergiquement frotté contre le banc de la classe. Voici encore un rasoir refroidi par son contact avec de la glace; et voici une pierre à aiguiser, sans huile, sur laquelle je frotte mon rasoir froid, comme pour le repasser. Je place maintenant le rasoir contre la face de la pile, et vous voyez que l'acier, qui était froid il y a une minute, est chaud maintenant. De même, je prends ce couteau de fer et ce couteau de bois, qui sont tous deux froids, et je frotte la lame de fer contre la lame de bois. Je place la lame de fer contre la pile, et vous voyez le résultat; une puissante déviation témoigne que le couteau est chaud. Je fais passer cette scie froide à travers cette pièce de bois, et je place d'abord la surface du bois contre laquelle la scie a frotté en contact avec la pile. L'aiguille se meut rapidement dans le sens qui indique que le bois s'est échauffé. Je laisse l'aiguille revenir à zéro, et je fais toucher la scie à la pile. Elle est chaude aussi. Ces exemples de la génération de la chaleur par le frottement sont les plus simples, les plus communs, et je les ai choisis pour cette raison. Tout vulgaires qu'ils paraissent, ils nous initieront par degrés aux secrets les plus intimes de la nature, et nous révéleront la constitution du monde matériel.

Passons à une expérience qui rende manifeste le développement de la chaleur par la compression. J'ai ici un morceau de sapin, à une température inférieure à celle de la salle, et donnant, lorsqu'il est mis en contact avec la pile, la déviation qui dénote du froid. Je place ce bois entre les plaques d'une petite presse hydraulique, et je le comprime fortement. Les plaques de la presse sont pareillement, vous le remarquerez, plus froides que l'air de la salle. Après la compression, je porte le bois au contact de la pile; voyez l'effet. Le galvanomètre prononce que de

la chaleur a été développée par l'acte de la compression. La même chose arrive exactement lorsque, plaçant cette balle de plomb entre les plaques de la presse, je la comprime au point de l'aplatir.

Arrivons aux effets de la percussion. J'ai ici une balle de plomb froide, que je place sur cette enclume froide, et je la frappe avec un lourd marteau pareillement froid. Le marteau tombe avec une certaine force mécanique, et son mouvement est soudainement détruit par la balle et l'enclume; évidemment la force du marteau est perdue. Mais examinons le plomb; vous voyez qu'il est chaud; j'ajoute que si nous pouvions recueillir toute la chaleur engendrée par le choc du marteau, et l'appliquer sans perte mécanique, nous serions capables, par son moyen, d'élever le marteau à la hauteur d'où il est tombé.

J'ai disposé ici une autre expérience, qui est presque trop délicate pour être exécutée avec les instruments grossiers nécessaires pour une leçon, mais que j'ai répétée plusieurs fois avant d'entrer aujourd'hui dans cette salle. Dans ce petit bassin j'ai versé du mercure refroidi au sein de la chambre voisine. J'ai recouvert de vernis l'une des faces de ma pile thermo-électrique pour la défendre du contact du mercure qui, autrement, la détruirait; ainsi protégée, je puis, comme vous voyez, la plonger dans le métal liquide. La déviation de l'aiguille montre que le mercure est froid. Voici deux verres A et B (fig. 2) enveloppés d'un épais maillot de lisières qui empêcheront complétement la chaleur de nos mains de se communiquer au mercure. Je verse le mercure froid d'un verre dans l'autre, plusieurs fois successivement. Il tombe avec une certaine force mécanique, son mouvement est détruit, mais de la chaleur est développée. La chaleur engendrée en versant une seule fois est extrêmement faible. Je pourrais vous donner sa mesure exacte; mais je réserve pour la prochaine leçon les évaluations quantitatives; je verse le mercure d'un verre dans l'autre dix ou quinze fois. Voyez ce qui arrive quand la pile est plongée dans le mercure : l'aiguille se meut, et son mouvement indique que le mercure qui, au commencement de l'expérience, était plus froid que la pile, est maintenant plus chaud

que la pile. Nous montrons en petit, dans une salle de cours, un effet qui se produit en grand dans la nature, à la base de chaque cascade. J'ai ici des amis qui se sont trouvés enveloppés dans l'écume du Niagara. Si, lorsqu'ils étaient là, ils avaient plongé un thermomètre suffisamment sensible dans l'eau, au sommet et au fond de la cataracte, ils l'auraient trouvée un peu plus chaude en bas qu'en haut. L'assertion des marins est, de même, théoriquement exacte ; l'eau de la mer est rendue plus chaude par l'agitation causée par une tempête, parce que le froissement mécanique des vagues est finalement converti en chaleur.



Fig. 2.

Partout où il y a frottement vaincu, il y a chaleur produite, et cette chaleur est la mesure de la force dépensée à vaincre le frottement. La chaleur est simplement la force primitive sous une autre forme, et pour éviter cette transformation il faudrait anéantir le frottement. Nous mettons habituellement de l'huile sur la pierre à aiguiser, nous graissons la scie, et nous avons grand soin de lubrifier les essieux de nos voitures. Que faisons-nous, en réalité, dans chacun de ces cas? Acquérons d'abord des notions générales, nous descendrons ensuite au détail. Le devoir du mécanicien, sur un chemin de fer, est de faire marcher son train d'un lieu à l'autre, de Londres à Édimbourg ou de Londres à Oxford, suivant l'occasion. Son désir est d'appliquer à ce but particulier la force de la vapeur ou du foyer qui donne à la vapeur sa tension. Il n'est pas de son intérêt de laisser une partie de cette force se convertir en un autre genre de force qui ne lui servirait pas à atteindre ce but. Il n'a nulle envie que ses essieux

s'échauffent, et pour cela il évite, autant que possible, de dépenser sa force à les échauffer. De fait il a obtenu sa force de la chaleur, et il ne s'agit nullement pour lui de ramener sa force à l'état de chaleur. Car, à chaque degré de chaleur engendrée par le frottement de ses essieux, correspondrait une perte déterminée et équivalente de la force mécanique qui doit entraîner le convoi. Il n'y a pas de perte absolue de force. Si nous pouvions recueillir toute la chaleur engendrée par le frottement, et la transformer sans perte en force mécanique, nous serions en état de communiquer au train la somme précise de vitesse qu'il a perdue par le frottement. Ainsi, chacun de ces employés de chemins de fer que vous voyez s'avancer avec leur pot de graisse jaune, et ouvrir les petites boîtes qui entourent les essieux des wagons, démontre expérimentalement, sans s'en douter, le principe qui constitue le lien d'union des phénomènes de la nature. Il affirme, à son insu, et la convertibilité et l'indestructibilité de la force. Il démontre pratiquement que l'énergie mécanique peut être convertie en chaleur, et que, lorsqu'elle est ainsi convertie, elle n'existe plus comme puissance mécanique; car, pour chaque degré de chaleur développée, un équivalent rigoureusement proportionnel de la *force locomotive* de la machine disparaît. On approche d'une station à raison de quarante à cinquante kilomètres à l'heure. On serre le frein; de la fumée et des étincelles s'échappent de la roue sur laquelle il agit. Le train est arrêté. Comment? Simplement par la conversion en chaleur de toute la force motrice qu'il possédait au moment où le frein a été serré.

Il en est de même du graissage de la scie du menuisier. Son but, dans l'application de la force musculaire de ses bras, est de faire passer la scie à travers le bois; il veut le diviser en deux parts, détruire sa cohésion mécanique par les dents de la scie. Lorsque la scie s'enfonce péniblement, à cause du frottement exercé contre sa surface plane, une même somme de force produit un effet bien moindre que lorsque l'outil avance presque sans frottement. Mais, en quel sens l'effet est-il moindre? Il ne l'est pas d'une manière absolue; il l'est relativement à l'effet cherché et qui était de scier le bois; la force non employée

à scier n'est pas perdue, elle est convertie en chaleur ; je vous en ai donné la preuve il y a quelques minutes. Cette fois encore, si nous pouvions recueillir la chaleur engendrée par le frottement, et l'appliquer à mouvoir la scie, nous retrouverions la quantité précise de travail que le menuisier, en négligeant de lubrifier son outil, a tout simplement converti en une autre forme de puissance.

Nous réchauffons nos mains en les frottant, et, dans les cas d'onglée, nous restituons ainsi à nos doigts endoloris la chaleur qu'ils avaient perdue. Les sauvages savent produire du feu par le frottement intelligent de morceaux de bois bien choisis. Il est aisé de charbonner le bois sur un tour par le frottement. Des pieds des paysans, sur la route du Hampshire, on voit s'échapper en abondance, dans une nuit obscure, des étincelles nées du choc de leurs souliers ferrés contre les cailloux. Quand on bat le briquet, les particules du métal détachées par le silex sont tellement échauffées par la collision qu'elles prennent feu et brûlent dans l'air. Mais la chaleur précède la combustion. Davy a trouvé que, lorsqu'une batterie de fusil à pierre tombait dans le vide, il ne se produisait pas d'étincelle, mais que les particules détachées de la platine, examinées au microscope, offraient des signes de fusion [1]. Voici un gros morceau de cristal de roche ; il me suffira de le frotter vivement avec un morceau plus petit pour faire naître un flot de lumière. Voici deux cailloux ; je les rends lumineux en les frottant l'un contre l'autre.

Un boulet, en traversant l'air, est échauffé par le frottement ; et la théorie la plus probable des aérolithes est que ce sont de petits corps planétaires, tournant autour du soleil, enlevés à leurs orbites par l'attraction de la terre, et rendus incandescents par leur frottement contre notre atmosphère. M. Joule a démontré, en effet, que la friction de l'air suffisait à produire cette température élevée ; peut-être même ne se trompe-t-il pas en affirmant que le plus grand nombre des aérolithes est dissipé par la chaleur, et que la terre échappe ainsi à un terrible bombarde-

[1] Œuvres de sir H. Davy, vol. II. p. 8

ment[1]. Ces corps se meuvent avec les vitesses qu'ils avaient dans leur orbite. Ces vitesses, pour les quatre planètes inférieures, sont :

	kilomètres par seconde.
Mercure.	48,92
Vénus.	35,78
La Terre.	30,43
Mars.	24,65

Elle varient, pour les aérolithes, de 30 à 60 kilomètres par seconde[2], et le frottement engendré par cette vitesse énorme est certainement suffisant pour produire les effets qu'on lui attribue.

Il y a plus de soixante-quatre ans, le comte de Rumford, un des fondateurs de Royal-Institution, exécuta, sur la génération de la chaleur par le frottement, une série d'expériences qui, éclairées de la lumière du jour actuel, sont du plus haut intérêt et de la plus grande importance. En vérité, les services que notre Institution a rendus, au point de vue de la grande question de la confraternité de toutes les forces naturelles, ne sauraient jamais être oubliés. Thomas Young, un des premiers professeurs de l'institution, a posé les bases de la théorie des ondulations de la lumière, qui, dans son application la plus large, comprend notre théorie actuelle de la chaleur. Davy avait sur la chaleur les vues que je viens exposer et élucider au milieu de vous. Faraday a établi les lois de l'équivalence entre l'affinité chimique et l'électricité; et ses découvertes sur l'électro-magnétisme ont été les premières dont Joule se soit emparé pour mettre en évidence la convertibilité mutuelle de la chaleur et de l'action mécanique[3]. Rumford, dans un mémoire aussi remarquable par le raisonnement que par l'expérience, soutenait, en 1798[4], relativement à la nature de la chaleur, la doctrine que les expériences récentes d'hommes éminents ont placée sur une base tout à fait certaine. Pendant qu'il faisait forer des canons à Munich, il fut si vivement frappé de la grande quantité de chaleur développée

[1] *Philosophical Magazine*, 4e série, vol. XXXII, p. 349.
[2] *Manuel d'astronomie*, par Galbraith et Houghton, p. 18.
[3] *Philosophical Magazine*, 4e série, vol. XXIII, p. 263, 347, 435.
[4] Un extrait du mémoire est donné dans l'appendice de la leçon II.

dans l'opération du forage, qu'il fut amené à inventer un appareil pour l'étude spéciale de la génération de la chaleur par le frottement. Il construisit un cylindre creux en fer, dans lequel entrait une sorte de pilon solide fortement pressé contre son fond. Dans une caisse enveloppe du cylindre il versait environ dix litres d'eau avec un thermomètre qui indiquât sa température, 16°. Un cheval faisait tourner le cylindre, et, une heure après que le frottement avait commencé, la température de l'eau était de 42°; elle s'était élevée de 26°. Après une heure et demie, la température fut de 61°; après deux heures, de 81°; et après deux heures vingt minutes, de 95°,5; au bout de deux heures trente minutes, l'eau entrait en pleine ébullition. Rumford donne une description très-pittoresque de l'effet produit par cette expérience sur ceux qui en furent les témoins. « Il serait difficile, » dit-il, « de décrire la surprise et l'étonnement exprimé par le « visage des assistants à la vue d'une si grande quantité d'eau « chauffée et rendue bouillante sans le moindre feu. Quoique, « dans ce résultat, il n'y eût rien de bien extraordinaire, « je reconnais franchement qu'elle me causa un plaisir en- « fantin tellement grand, que j'aurais dû certainement le ca- « cher et non le laisser paraître, si j'avais ambitionné la répu- « tation d'un grave philosophe[1]. » Vous et moi, j'en suis sûr, nous renonçons de grand cœur à l'application de toute philosophie qui tendrait à étouffer l'émotion dont Rumford fait ici l'aveu. Partant de cette expérience frappante, M. Joule[2] a estimé la quantité de force mécanique dépensée à produire de la chaleur, et il a obtenu un chiffre qui ne s'éloigne pas beaucoup de la valeur qu'une plus grande connaissance du sujet et des expériences plus délicates lui ont permis d'obtenir pour l'équivalent numérique de la chaleur et du travail.

Il serait absurde de ma part de vouloir répéter ici l'expérience de Rumford dans toutes ses conditions primitives. Je ne puis consacrer deux heures et demie à une seule démonstration, mais

[1] Rumford, *Essays*, vol. II, p. 484.
[2] *Philosophical Transactions*, vol. CXL. p. 62.

je suis en mesure de vous montrer en substance le même effet en *deux minutes et demie*. J'ai ici un tube de cuivre, dont la longueur est de 10 centimètres, le diamètre de 2 centimètres. Il est bouché au fond, et je le visse verticalement sur une table avec roue, et manivelle pour le faire tourner rapidement. J'ai en outre deux morceaux de bois de chêne réunis par une charnière, et dans lesquels sont creusées deux rainures semi-circulaires, destinées à embrasser le tube de cuivre. Ces morceaux de bois forment une sorte de pince, T (fig. 3), et, en serrant doucement, je

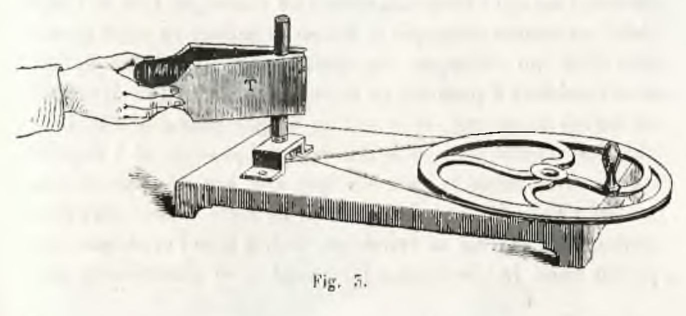


Fig. 3.

puis produire un frottement entre le bois et le tube de cuivre mis en rotation. Je remplis à peu près le tube d'eau froide, je le bouche avec un bouchon de liége pour empêcher que le liquide s'échappe et m'éclabousse, et je mets l'appareil en mouvement. Tant que l'action continue, la température de l'eau s'élève, et quoique les deux minutes et demie ne soient pas encore écoulées, ceux qui sont près de l'appareil peuvent voir la vapeur s'échapper du bouchon. Trois ou quatre fois, aujourd'hui, j'ai projeté le bouchon par la force de la vapeur à une hauteur de 7 mètres dans l'air; c'est ce qui arrive encore : la vapeur suit le bouchon, et, en se précipitant, produit ce petit nuage dans l'atmosphère.

Dans toutes les expériences faites jusqu'ici, de la chaleur a été engendrée aux dépens de la force mécanique; nous avons vu que partout où de la force mécanique est dépensée, de la chaleur est produite; le moment est venu de faire devant vous l'expérience inverse, de vous montrer qu'il y a perte de chaleur quand il y

a travail mécanique. La matière est ardue, et je vous exhorte à la patience dans le cas où vous ne saisiriez pas immédiatement la portée des nouvelles expériences. J'ai ici un vase solide, rempli à présent d'air comprimé. Il est comprimé depuis quelques heures, de sorte que la température de l'air dans le vase est la même que celle de l'air de la chambre. A présent donc, l'air intérieur presse contre les parois, et si j'ouvre ce robinet, une portion de cet air s'élancera violemment hors du vase. Le mot *s'élancera* n'exprime que vaguement le véritable état des choses; l'air qui s'élance au dehors est chassé par l'air de l'intérieur; ce dernier accomplit le travail de pousser en avant le courant d'air qui s'échappe. Or, quelle sera la condition de l'*air* ainsi condamné à produire un travail? Il se refroidira. Il exécute un travail mécanique, et le seul agent qu'il puisse appeler à son aide pour l'exécuter, c'est la chaleur qu'il possède, et à laquelle est due entièrement la force élastique avec laquelle il presse contre les parois du vase. Une portion de cette chaleur sera donc consommée, et l'air se refroidira. Suivez bien l'expérience que je vais faire. Je vais tourner le robinet *c*, et permettre au cou-

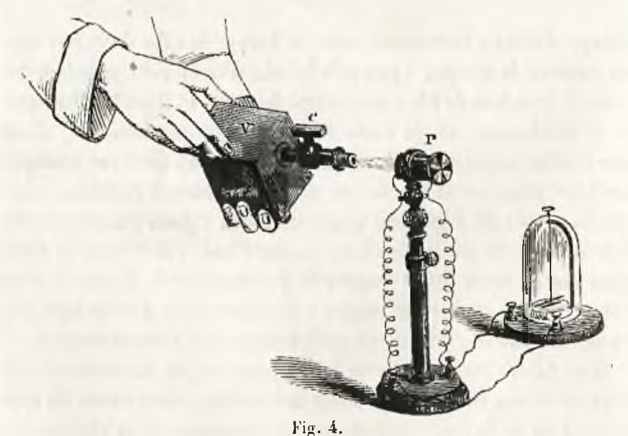


Fig. 4.

rant d'air qui sortira du vase V (fig. 4) d'aller frapper la pile P. Voyez comment l'aiguille aimantée répond à cette action; son

extrémité rouge est poussée vers moi, attestant ainsi que la pile a été *refroidie* par le courant d'air.

L'effet est tout différent lorsque le courant d'air, poussé par le tuyau d'un soufflet ordinaire, vient frapper la pile thermo-électrique. Dans la première expérience que nous venons de faire, le travail mécanique de pousser l'air en avant était exécuté par l'air lui-même, et une portion de sa chaleur était consommée dans cet effort. Dans le cas du soufflet, ce sont nos muscles qui exécutent le travail. J'élève la planche supérieure du soufflet, et l'air entre dedans; je presse les planches avec une certaine force, et l'air s'élance au dehors. L'air expulsé frappe la face de la pile, son mouvement est arrêté, et une quantité de chaleur équivalente à la destruction de ce mouvement est immédiatement engendrée. Aussi, observez-vous que, quand je lance avec le soufflet (fig. 5) un courant d'air contre la pile, l'extrémité rouge

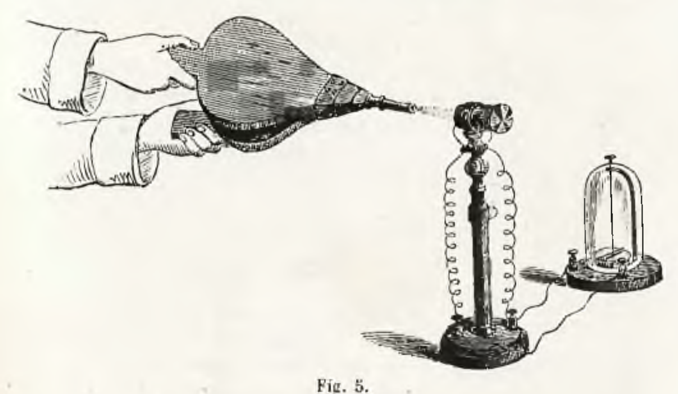


Fig. 5.

de l'aiguille se porte vers vous, montrant par là que la face de la pile a été, dans ce cas, *échauffée* par l'air qui l'a frappée. Je prends une bouteille d'eau de Seltz, un peu plus chaude actuellement que la pile, comme vous le voyez par la déviation qu'elle produit; je coupe la ficelle qui retient le bouchon, et il est chassé par la force élastique du gaz acide carbonique; le gaz fait un travail; en le faisant il a consommé de la

chaleur, et vous voyez que maintenant la déviation produite est celle du froid. Le plus vrai des romans est dans les détails de la vie de chaque jour; et, jusque dans les opérations qui sont familières à chaque enfant, nous discernons graduellement l'explication des principes d'où découlent tous les phénomènes matériels.

APPENDICE A LA LEÇON I

NOTE SUR LA CONSTRUCTION DE LA PILE THERMO-ÉLECTRIQUE

Soient AB (fig. 6) un barreau d'antimoine et BC un barreau de bismuth ; supposons que les deux barreaux soient soudés en B. Supposons aussi que les extrémités libres A et C soient unies par un fil métallique ADC. Si l'on chauffe le point de jonction B, un courant électrique est engendré, et sa direction va du bismuth à l'antimoine (de B en A, ou à l'inverse de l'alphabet), à travers la soudure, et de l'antimoine au bismuth (de A en B, dans le sens des lettres de l'alphabet) par le fil de jonction ADC. La flèche indique le sens du courant.

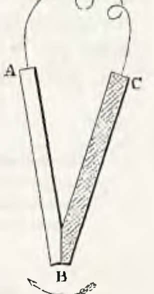


Fig. 6.

Si la soudure B est refroidie, il naît un courant de sens opposé au premier.

L'ensemble des deux barreaux représente ce qu'on appelle un couple ou élément thermo-électrique.

Le courant engendré par la réunion de plusieurs couples thermo-électriques, sera naturellement plus puissant que le courant né d'un seul couple.

La fig. 7, par exemple, représente une pile composée, dans laquelle les barreaux ombrés sont tous de bismuth, et les barreaux non ombrés d'antimoine; en chauffant toutes les soudures B, B, B, etc., un courant est engendré dans chaque couple, et la somme de ces courants qui tous marchent dans le même sens, produit un courant résultant plus fort que celui qui est obtenu d'un seul couple. Le V formé par chaque paire n'a pas besoin d'être aussi grand qu'il le paraît dans la fig. 7 ; il peut être resserré sans nuire au couple. Et pour enfermer plusieurs éléments dans un petit espace, on les dispose comme dans la fig. 8, où les raies noires représentent de petits barreaux de bis-

muth, et les raies blanches de petits barreaux d'antimoine. Soudés ensemble à leurs extrémités; les couples sont d'ordinaire simplement

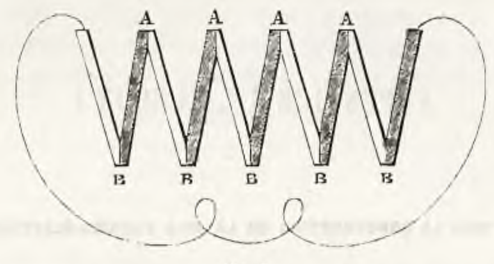


Fig. 7.

séparés dans leur longueur par des bandes de papier. Une collection d'éléments ainsi réunis en paquet constitue une pile thermo-électrique, représentée fig. 9.

Le courant produit par la chaleur allant toujours du bismuth à l'antimoine par la soudure chauffée, il suffit d'un regard jeté sur la fig. 7, pour comprendre que lorsque les soudures chauffées sont les

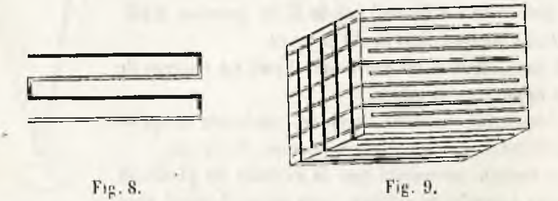


Fig. 8. Fig. 9.

soudures A, A, il se produit un courant opposé en direction à celui qui naît quand la chaleur est appliquée aux soudures B, B. Il suit de là que dans le cas de la pile thermo-électrique, l'effet de la chaleur tombant tour à tour sur ses deux faces opposées, est d'engendrer deux courants de sens contraires. Si la température des deux faces est la même, les courants se neutralisent, quelque élevée que puisse être d'ailleurs la température absolue de l'ensemble; mais si l'une des faces est plus chaude que l'autre, il se produit un courant. Le courant est ainsi dû à une différence de température entre les deux faces de la pile; et, entre certaines limites, sa force est proportionnelle à cette différence.

On peut obtenir des courants électriques de la soudure de presque tous les autres métaux, mais les plus intenses sont engendrés par l'union du bismuth et de l'antimoine[1].

NOTE SUR LA CONSTRUCTION DU GALVANOMÈTRE

L'existence et la direction d'un courant électrique sont manifestées par son action sur une aiguille aimantée librement suspendue.

Mais cette aiguille aimantée est retenue dans le méridien magnétique par la force magnétique de la terre ; pour la déplacer, si elle était seule, il faudrait donc vaincre cette force magnétique de la terre.

Des courants très-faibles seraient impuissants à la faire dévier d'une quantité appréciable à la vue ; et pour rendre sensible l'action de ces faibles courants, il a fallu recourir à l'un des deux expédients que nous allons dire :

Le premier consiste à faire faire au fil que le courant parcourt plusieurs tours sur lui-même, de manière à constituer une petite bobine au sein de laquelle l'aiguille est suspendue et oscille librement. L'action du courant s'ajoute alors plusieurs fois à elle-même, et devient comparable à celle d'un courant plus intense.

Le second expédient consiste à neutraliser la force directrice de la terre, sans nuire à l'aimantation de l'aiguille. C'est ce que l'on obtient en prenant deux aiguilles au lieu d'une, et en les fixant à un même axe vertical, avec leurs pôles de noms contraires superposés, de sorte que l'extrémité nord d'une aiguille et l'extrémité sud de l'autre regardent le même point de l'horizon. La double aiguille est représentée fig. 10.

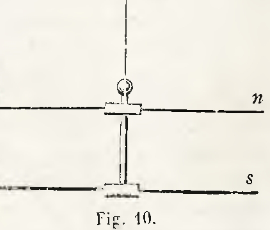


Fig. 10.

On doit s'arranger de façon que l'une des aiguilles soit dans l'intérieur de la bobine, dont le courant suit les contours, et que l'autre oscille librement au-dessus, l'axe

[1] La découverte des courants thermo-électriques est due à Thomas Seebeck, professeur à l'Université de Berlin. Nobili construisit la première pile thermo-électrique ; elle est devenue, dans les mains de Melloni, un instrument si important, qu'il a remplacé tous les autres dans les recherches sur la chaleur rayonnante. C'est le seul dont on se servira dans toute la suite de ce cours.

qui les lie passant par une fente convenablement ménagée dans la bobine. Si les aiguilles étaient toutes deux à l'intérieur, le même courant les pousserait dans des directions opposées, leurs tendances au déplacement s'annuleraient mutuellement ; mais quand l'une est en dedans et l'autre en dehors, le courant tend à les déplacer dans la même direction, et leurs actions s'ajoutent.

Voici la manière de préparer une paire d'aiguilles. On les aimante toutes les deux à saturation ; puis on les suspend dans un vase, ou sous un abri qui les défende des courants d'air. Le système se placera probablement dans le méridien magnétique, parce que l'une des aiguilles est presque toujours plus forte que l'autre : on affaiblit la plus forte en la touchant doucement avec un petit aimant ; lorsque les deux aiguilles sont exactement de même force, elles se placent *perpendiculairement au méridien magnétique.*

On peut supposer, quand les aiguilles sont d'égale force, que l'action directrice de la terre est complétement annulée, et que la double aiguille est parfaitement *astatique,* c'est-à-dire qu'elle est parfaitement indifférente en ce qui concerne sa direction ; et qu'elle n'obéit qu'à la torsion du fil de suspension. C'est ce qui arriverait si les axes magnétiques des deux aiguilles pouvaient être amenés avec une exactitude mathématique dans le même plan vertical. Dans la pratique cela est à

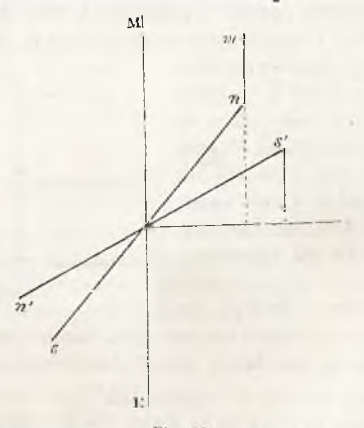


Fig. 11.

peu près impossible ; les axes divergent ou font toujours entre eux un angle. Soient ns, $n's'$ (fig. 11) les axes divergents de deux aiguilles

et M la direction du méridien magnétique; supposons que le pôle n soit entraîné par l'attraction de la terre dans la direction $n\ m$, et que le pôle s' soit poussé par sa répulsion dans la direction opposée. Lorsque les pôles n et s' sont exactement de même force, il est évident que la force agissant sur le pôle s', dans le cas présent, aura l'avantage à cause de la plus grande longueur de son bras de levier, et que, par suite, elle l'emportera sur la force qui tend à entraîner n. Les aiguilles divergentes tourneront donc en s'éloignant du méridien magnétique: et, avec un peu de réflexion, on verra qu'elles n'arriveront au repos que lorsque la ligne bissectrice de l'angle des aiguilles sera perpendiculaire au méridien magnétique.

Cette orientation est la preuve de la parfaite égalité de l'aimantation des aiguilles; mais avant d'arriver là, il faut se résigner à passer par plusieurs positions obliques au méridien magnétique. On peut quelquefois compenser la force plus grande d'une aiguille par un bras de levier plus grand, laissé à l'autre. Quelquefois aussi il arrive qu'une seule touche suffise à rendre les aiguilles parfaitement égales; mais le plus souvent on perd bien des heures avant d'arriver à la compensation parfaite. Heureusement, ce n'est que dans des expériences très-délicates qu'on a besoin de cette égalité absolue; mais elle est alors tout à fait essentielle.

Une autre grave difficulté a fort gêné les expérimentateurs, même après que l'égalité d'aimantation des deux aiguilles avait été parfaitement réalisée. Ces aiguilles sont sensibles à la plus légère action magnétique, et le fil de cuivre recouvert de soie, dont la bobine est formée, contient habituellement des traces de fer suffisantes pour les faire dévier de leur vraie position. Un de mes fils causait une déviation de 30°, et dans les magnifiques instruments employés par le professeur Du Bois Raymond dans ses recherches sur l'électricité animale, la déviation produite par le fil de la bobine, a été quelquefois plus grande encore. Melloni avait rencontré cette difficulté, et pour la vaincre il avait proposé d'étirer les fils à travers des trous d'agate, évitant ainsi tout contact avec le fer et l'acier. C'est toujours aux traces de fer contenu dans le fil de cuivre, qu'on a attribué les perturbations des aiguilles; aussi a-t-on proposé de substituer l'argent au cuivre.

Pour continuer ses belles recherches thermo-électriques d'une manière satisfaisante, M. le professeur Magnus, de Berlin, prépara du cuivre pur par un procédé électrolytique très-laborieux; mais quand il eut obtenu le métal, il fallut le fondre huit fois successivement, avant qu'il fût assez ductile pour être étiré en fils. De fait, la fatale

impureté du cuivre des fils est le plus grand obstacle à l'exactitude des indications des instruments, et l'on ne saurait s'imposer trop de travail pour l'écarter. Ce qui m'est arrivé à ce sujet ne laisse pas que d'être instructif. J'avais un beau galvanomètre construit il y a peu d'années par Sauerwald, de Berlin, mais dont le fil, lorsque aucun courant ne le traversait, entraînait ma double aiguille à 30° pleins de la ligne zéro. On ne pouvait demander à cet instrument aucune mesure quantitative.

Je chargeai M. Becker d'enlever le fil de la bobine et de le remplacer par du fil anglais; la déviation tomba à 3°.

C'était une grande amélioration, insuffisante encore pour le but que je voulais atteindre. Je cherchai les moyens d'obtenir du cuivre pur, mais le résultat de mes recherches fut tout à fait décourageant. Au moment où je perdais presque tout espoir, il me vint une idée : l'action perturbatrice des fils est due à un mélange du fer avec le cuivre, car le cuivre pur est diamagnétique, il est faiblement *repoussé* par un aimant puissant. L'aimant se révélait ainsi à moi comme un moyen d'analyse instantanée ; je pouvais, grâce à lui, reconnaître immédiatement si un cuivre donné est exempt ou non de tout alliage avec un métal magnétique.

Le fil de M. Sauerwald était fortement attiré par l'aimant ; le fil de M. Becker était attiré aussi, mais à un bien plus faible degré.

L'un et l'autre étaient recouverts de soie verte, que j'enlevai; le fil de Berlin était encore attiré; le fil anglais, au contraire, était faiblement repoussé lorsqu'on le présentait nu à l'aimant; le second était vraiment diamagnétique, et ne contenait pas de traces sensibles de fer. Tout le mal venait donc de la soie verte; on avait sans doute eu recours pour la teindre à quelque composition ferrugineuse qui devenait ainsi cause de la déviation du zéro. J'ai enlevé l'enveloppe verte et j'ai fait recouvrir les fils avec de la soie blanche, enroulée par des mains très-propres. Il en est résulté un galvanomètre parfait; lorsque l'aiguille n'est plus sous l'action du courant, elle revient exactement au zéro, et la couverture n'exerce sur elle aucune action magnétique. Tandis que nous allions chercher bien loin des filières d'agate et de savants moyens de préparer du cuivre chimiquement pur, le remède aux perturbations de nos aiguilles était tout près de nous. Éprouvons par l'aimant le fil à choisir, et nous entrerons sans peine en possession d'un cuivre magnétiquement pur.

LEÇON II

(30 JANVIER, 1862)

Nature de la chaleur. — Théorie matérielle. — Théorie dynamique. — Effets thermiques de l'air en mouvement. — Génération de la chaleur par la rotation entre les pôles d'un aimant. — Expériences de Rumford, Davy et Joule. — Équivalent mécanique de la chaleur. — Chaleur engendrée par des projectiles. — Chaleur qui serait engendrée si on arrêtait le mouvement de la terre. — Théorie météorique de la chaleur du soleil. — De la flamme dans ses rapports avec la théorie dynamique.

Appendice. — Extraits de Bacon et de Rumford.

Dans notre première leçon, nous avons mis en évidence la chaleur due à des actions mécaniques, par des expériences qui prouvent qu'elle est aisément produite par le frottement, la compression et la percussion. Mais la démonstration du fait ne suffit pas à satisfaire l'esprit humain ; il faut en outre que nous connaissions la cause intime et invisible du fait; que nous découvrions les principes en vertu desquels les phénomènes sont produits. Pourquoi l'action mécanique engendre-t-elle de la chaleur, et quelle est la nature réelle de l'agent ainsi engendré? Deux théories rivales s'offrent à répondre à ces questions. Tout récemment encore l'une d'elles, la *théorie matérielle*, ne rencontrait presque que des partisans ; elle n'avait pour adversaires qu'un petit nombre d'hommes éminents. Dans de certaines limites cette théorie se présentait à l'esprit sous une forme très-simple, et cette simplicité lui assurait un accueil général. La théorie matérielle admet que la chaleur est une sorte de matière, un fluide subtil remplissant les espaces intra-atomiques des corps. Le laborieux Gmélin, par exemple, dans son manuel de

chimie, définit la chaleur « une substance dont l'entrée dans nos corps cause la sensation du chaud et sa sortie la sensation du froid [1]. » Il parle aussi de chaleur se combinant avec les corps comme deux substances pondérables se combinent entre elles; beaucoup d'autres chimistes éminents traitent le sujet au même point de vue.

Le développement de la chaleur par des moyens mécaniques, en ce sens surtout que sa génération semble tout à fait illimitée, devenait pour les partisans de sa matérialité une difficulté très-grande, quoiqu'ils connussent ce fait (je dois amplement l'éclaircir dans une leçon subséquente), que les différents corps possèdent à des degrés différents la faculté de contenir de la chaleur, si je puis user de ce terme. Prenez, par exemple, deux liquides, l'eau et le mercure, et portez à cinquante ou soixante degrés la température de chacun d'eux. La quantité absolue de chaleur requise par l'eau pour que sa température s'élève de 10°, est plus de trente fois la quantité requise par le mercure. Dans le langage technique on dit que l'eau a pour la chaleur une plus grande *capacité* que le mercure; et ce terme *capacité* suffit à exprimer la pensée de ceux qui l'ont inventé. On supposait que l'eau avait le pouvoir d'emmagasiner le calorique ou la matière de la chaleur, d'en cacher ou d'en dissimuler, de fait, une quantité telle qu'elle a besoin de trente mesures de calorique pour produire en elle le même effet que le mercure aurait produit en lui avec une seule mesure.

Toutes les substances sont douées, à un degré plus ou moins élevé, de ce pouvoir apparent d'emmagasiner la chaleur. Le plomb, par exemple, le possède; et l'expérience, par laquelle j'ai prouvé devant vous que la compression d'une balle de plomb engendrait de la chaleur, était interprétée comme il suit par les partisans de la théorie matérielle. Le plomb non comprimé, disaient-ils, a une plus grande capacité pour la chaleur que le plomb comprimé; sa capacité d'emmagasinage atomique est diminuée par la compression; et par suite, lorsqu'on vient à comprimer le

[1] Traduction anglaise, vol. I, p. 22.

plomb, une portion de la chaleur qui, avant la compression, était cachée, doit se montrer; la substance comprimée devenant désormais incapable de contenir le tout. On expliquait d'une manière à peu près semblable la chaleur née du frottement et de la percussion. L'idée d'appeler de *nouvelle chaleur* à l'existence était repoussée par les croyants à la matérialité. Dans leur manière de voir, la quantité de chaleur existant dans l'univers est aussi constante que la quantité de matière ordinaire, et tout ce que nous pouvons faire par des moyens mécaniques, c'est d'emmagasiner de la chaleur, ou de la faire sortir de ses cachettes pour la produire au grand jour.

La *théorie dynamique*, ou, comme elle est quelquefois appelée, la *théorie mécanique* de la chaleur, écarte l'idée de matérialité en tant que s'appliquant à la chaleur. Ceux qui soutiennent cette théorie croient que la chaleur n'est pas de la matière, mais un accident ou une condition de la matière; c'est-à-dire, *un mouvement de ses dernières particules*. De la contemplation directe de quelques-uns des phénomènes de la chaleur, un esprit profond est conduit presque instinctivement à admettre que la chaleur est une espèce de mouvement. Bacon a soutenu une thèse de ce genre [1], et Locke a exprimé la même opinion avec un bonheur singulier. « La chaleur, » dit-il, « est « une très-vive agitation des parties insensibles de l'objet qui « produit en nous la sensation qui nous fait dire que cet objet « est chaud; de sorte que ce qui, dans notre sensation, est de la « *chaleur*, n'est dans l'objet que du *mouvement*. » Dans notre dernière leçon, j'ai rappelé les expériences du comte Rumford [2], sur le forage des canons; il prouva que les petits morceaux chauds détachés du canon ne changeaient pas de capacité pour la chaleur ; recueillant les copeaux et la poussière détachés du métal par l'outil, et les présentant à ses contradicteurs, il leur demanda

[1] Voyez l'appendice à cette leçon.

[2] J'éprouve un plaisir particulier à recommander à l'attention du lecteur un extrait du mémoire du comte Rumford, sur la génération de la chaleur par le frottement, rapporté dans l'appendice de cette leçon. Rumford, dans ce mémoire, anéantit la théorie de la matérialité de la chaleur. On n'a rien écrit de plus fort jusqu'à présent sur ce sujet.

s'ils pensaient que l'énorme quantité de chaleur dégagée fût sortie tout entière de cette petite quantité de raclures de métal? Il aurait pu ajouter : Vous ne vous êtes pas donné la peine de chercher si un changement quelconque était survenu dans la capacité du métal pour la chaleur par le fait du frottement. Vous êtes prompts à inventer des raisons pour sauver votre théorie de la ruine, mais très-lents à vous enquérir si ces raisons ne sont pas simplement de subtiles chimères de votre propre cerveau. Les théories sont indispensables, mais elles agissent quelquefois sur notre esprit à la façon des drogues. Les hommes se prennent de passion pour elles comme pour les liqueurs enivrantes, sauf à devenir mécontents et irrités lorsqu'on leur enlèvera ces stimulants de leur imagination.

Une expérience de Davy trouve naturellement ici sa place[1] et son explication. La glace est de l'eau solide, et la capacité pour la chaleur de cette eau solide n'est que la moitié de celle que possède l'eau liquide. Une quantité de chaleur qui élèverait de dix degrés la température d'un kilogramme de glace n'élèverait que de cinq degrés celle d'un kilogramme d'eau. Pour liquéfier simplement une masse de glace, il faut une énorme quantité de chaleur, parce que cette chaleur est si complétement absorbée ou rendue *latente*, qu'elle ne fait aucune impression sur le thermomètre. La question de la chaleur latente sera pleinement discutée dans une autre leçon ; ce dont je désire maintenant pénétrer votre esprit, c'est que l'*eau liquide*, à la température de sa congélation, possède une quantité de chaleur énormément plus grande que la glace à la même température.

Cela posé, Davy raisonnait ainsi : « Si, par le frottement, je parviens à liquéfier la glace, je produirai une substance qui contiendra une quantité de chaleur absolue beaucoup plus grande que celle contenue dans la glace; et, dans ce cas, on ne pourra pas dire, avec quelque apparence de raison, que j'aurai simplement rendu sensible la chaleur cachée dans la glace, puisque cette quantité de chaleur ne sera qu'une petite fraction de la

[1] Work of sir H. Davy, vol. II, p. 11.

chaleur contenue dans l'eau. » Il tenta l'expérience, et liquéfia de la glace par le seul frottement; ce résultat est devenu le premier argument en faveur de l'immatérialité de la chaleur.

Lorsqu'on frappe une cloche avec un marteau, le mouvement du marteau est éteint, mais la force qui l'animait n'est pas anéantie; elle fait naître dans la cloche des vibrations qui affectent les nerfs de l'ouïe en produisant la sensation du son. De même, lorsque notre lourd marteau descendait sur la balle de plomb, le mouvement descendant du marteau était empêché, mais non pas détruit; *transmis aux atomes du plomb*, il se manifestait aux sens du toucher sous forme de chaleur. La théorie que Rumford appuya si énergiquement, que Davy défendit si habilement[1], était que la chaleur est une espèce de mouvement moléculaire; et que ce mouvement peut être engendré par le frottement, la percussion et la compression, aussi bien que par la combustion. Telle est la théorie qui devra se développer graduellement dans le cours de ces leçons, jusqu'à ce qu'elle soit devenue pour vos esprits d'une évidence parfaite. Souvenez-vous que nous entrons dans un fourré, et qu'il ne faut pas s'attendre à marcher dans des sentiers lumineux. Nous devrons d'abord frapper au hasard sur les broussailles; mais, petit à petit, nous nous familiariserons avec le caractère général de nos recherches; et, pour peu que la persistance ne nous manque pas, nous arriverons à surmonter toutes les difficultés.

Dans la première leçon, je vous ai montré l'effet d'un courant d'air comprimé projeté contre la face de pile thermo-électrique. Vous avez vu que l'instrument était refroidi par le courant d'air. On sait cependant que la compression de l'air dégage de la chaleur, et que de la *chaleur* est développée lorsque l'air est

[1] Dans son premier mémoire scientifique, Davy appelle la chaleur un mouvement répulsif, qu'il dit pouvoir être accru de différentes manières : « d'abord par la transformation du mouvement mécanique en mouvement répulsif; c'est-à-dire par le frottement ou la percussion. Dans ce cas, le mouvement mécanique perdu par les masses de matière soumises au frottement est le mouvement répulsif gagné par leurs particules. » Passage extrêmement remarquable. J'ai donné plus loin des extraits de ce mémoire dans l'appendice de la leçon III.

comprimé; depuis jeudi dernier, on m'a demandé ce qu'il arrivait de cette chaleur dans le cas de l'air condensé. Écoutez, je vous prie, ma réponse. En supposant que le vase qui contient l'air comprimé soit formé d'une substance parfaitement imperméable à la chaleur, et que toute la chaleur développée par mon bras dans l'acte de la compression de l'air soit restée dans l'intérieur du vase, cette quantité de chaleur suffirait exactement à défaire ce que j'ai fait, et à rétablir l'air comprimé dans son volume et sa température primitives. Mais ce vase V (fig. 12) n'est pas im-



Fig. 12.

perméable à la chaleur, et il n'entrait pas dans mes vues de recueillir la chaleur développée par mon bras; j'ai donc laissé le vase en repos après avoir comprimé l'air, jusqu'à ce que toute la chaleur engendrée par la compression eût été dissipée, et que la température de l'air fût la même au dedans et au dehors. Lors donc que l'air s'est élancé, il n'avait plus, pour la restituer, la chaleur développée dans l'acte de sa compression. La chaleur qui fait naître la force élastique suffisait à le maintenir à la température de l'air environnant. Mais, dans le travail qu'il accomplit en sortant, une portion de cette chaleur, équivalente au travail accompli, est consommée, et l'air expulsé est par conséquent refroidi. Ne vous découragez pas si ce raisonnement ne vous paraît pas tout

à fait clair. Nous sommes encore plongés dans une obscurité relative, mais à mesure que nous avancerons, la lumière se fera graduellement, et, par un effet rétroactif, elle illuminera nos ténèbres actuelles.

Je tiens à vous faire voir d'une manière évidente que de la chaleur est développée par la compression de l'air. Voici un fort cylindre de verre TU (fig. 13), calibré avec soin, et bien lisse à l'intérieur. Le piston ne permet aucune issue à l'air situé au-dessous, de sorte qu'en l'enfonçant, je pourrai comprimer cet air très-fortement; et lorsque l'air sera ainsi comprimé, de la chaleur sera soudainement engendrée. Prouvons-le. Je prends un morceau de coton, et je l'imbibe de ce liquide volatil, du bisulfure de carbone. Je jette ce petit morceau de coton imbibé dans le tube, et je l'en retire immédiatement. Il a laissé au fond une petite quantité de vapeur. Je comprime l'air subitement, et vous voyez jaillir un éclair de lumière. La chaleur développée par la compression a été suffisante pour enflammer la vapeur. Il n'est pas nécessaire de retirer le coton humide; je le replace dans le tube, et je fais descendre vivement le piston; vous voyez l'éclair de lumière comme auparavant. Si, à l'aide de ce tube étroit de verre, je chasse en soufflant la fumée engendrée par la combustion de la vapeur, je puis, sans enlever le coton du gros tube, recommencer vingt fois[1].

T

U

Fig. 13.

J'ai disposé ici une expérience destinée à vous fournir une seconde preuve des effets de chaleur produits au sein de l'air par sa propre action mécanique. Voici un tube en fer-blanc, fermé à ses deux bouts, et communiquant avec cette machine pneumatique. Le tube est maintenant plein d'air, et je présente la face de ma pile à sa surface courbe. L'instrument annonce que la face de la pile en contact avec le tube a été échauffée par celui-ci. Je m'attendais à ce résultat, parce

[1] L'accident qui a conduit à donner à cette expérience sa forme actuelle est rapporté dans l'appendice qui suit cette leçon.

que j'avais des raisons de croire que l'air intérieur du tube était un peu plus chaud que l'air extérieur. Maintenant, voici ce que vous allez observer :

Mes préparateurs vont faire jouer les pistons; les cylindres de la machine pneumatique se videront, et l'air intérieur du tube de fer-blanc envahira les cylindres vides par sa propre force élastique. J'ai déjà démontré l'effet de refroidissement produit sur la pile thermo-électrique par un courant d'air comprimé. Dans l'expérience actuelle, je ne veux nullement examiner la condition thermique du courant, mais celle du vase dans lequel le travail a été fait. Quand le vide sera fait dans le tube, je m'attends à voir l'aiguille, qui est maintenant si considérablement déviée dans le sens de la chaleur, revenir à zéro, et passer tout à fait à 90° du côté du froid. Les pistons sont maintenant en mouvement; voyez le résultat. L'aiguille revient comme je l'ai prédit, et son élan dans la direction du froid n'est arrêté que par le choc contre l'obstacle qui l'empêche d'aller plus loin.

Trois coups de piston suffisent pour refroidir le tube au point d'envoyer l'aiguille à 90° [1]; laissons-la maintenant revenir au repos. Il faudrait plus de temps que nous n'en avons pour laisser le tube reprendre la température de l'air environnant; mais l'aiguille est maintenant à peu près immobile du côté froid, à une bonne distance du zéro. Je laisse rentrer dans le tube une quantité d'air égale à celle qu'on en a extrait, il y a un moment, avec la machine pneumatique. Il me suffira de tourner ce robinet pour que l'air rentre et que chacune de ses molécules aille frapper comme un projectile la surface intérieure du tube. Le mouvement mécanique de la molécule sera détruit; mais non sans qu'une quantité de chaleur équivalente à ce mouvement soit engendrée. Ainsi, à mesure que l'air entrera, il se développera une quantité de chaleur suffisante pour chauffer de nouveau le tube, pour changer le sens de la déviation actuelle et pour pro-

[1] Le galvanomètre employé dans cette expérience était celui dont je me suis servi dans mes recherches originales; il est extrêmement délicat. Dans la leçon, il était éclairé par la lumière électrique, qui projetait sur un écran une image de son cadran de 60 centimètres de diamètre.

jeter l'aiguille du côté chaud du zéro. L'air rentre maintenant ; l'aiguille se meut et va tout à fait à 90° du côté qui indique l'échauffement de la pile[1].

J'ai maintenant à appeler votre attention sur un fait intéressant qui se rattache à ce refroidissement de l'air par sa raréfaction. Je place sur le plateau de la machine pneumatique un grand récipient en verre, actuellement rempli avec l'air de cette salle. Cet air, comme en réalité tout air, à moins qu'il ne soit desséché artificiellement, contient une petite quantité de vapeur d'eau, laquelle, en sa qualité de vapeur, est absolument invisible. Il faut une certaine température pour maintenir cette vapeur à l'état invisible; et, si l'air est refroidi au-dessous de cette température, la vapeur est immédiatement condensée et forme un nuage visible. Un nuage de ce genre qui, vous vous en souvenez, n'est pas de la vapeur, mais de l'eau liquide à un état de très-grande division, se formera dans l'intérieur du récipient en verre R (fig. 14) lorsqu'on extraira l'air ; et, pour que l'effet produit soit aperçu de toutes les personnes placées à ma droite et à ma gauche, aussi bien que de celles qui sont en face de moi, j'ai fait disposer en demi-cercle, autour du récipient, six petits becs de gaz. Chaque spectateur voit un ou plusieurs de ces jets en regardant à travers le récipient; et, en s'obscurcissant, lorsque le nuage se formera, la lumière des becs signalera l'apparition du nuage. On vient de mettre en jeu les pistons de la machine pneumatique, et quelques coups ont suffi pour précipiter la vapeur à l'état visible ; la

[1] Dans cette expérience, une simple ligne, le long de la surface du tube, était en contact avec la face de la pile, et la chaleur avait à se propager à travers l'enveloppe de fer-blanc, avant d'atteindre l'instrument. Avant d'adopter cet arrangement, j'avais ménagé au fond du tube une ouverture, et j'avais hermétiquement scellé dans cette ouverture une petite pile thermo-électrique isolée, avec sa face tournée vers l'intérieur du tube. La pile était ainsi en contact direct avec l'air, et exposée à son action par sa face entière. L'effet obtenu de cette manière était très-grand, suffisant, en effet, pour faire parcourir à l'aiguille le tour entier du cadran. Mais, dans mon juste désir de compliquer le moins possible mes démonstrations, j'ai renoncé à la pile scellée dans le tube pour revenir à l'instrument avec lequel mon auditoire est déjà familiarisé. Avec la disposition actuellement adoptée, les effets sont d'ailleurs si grands, que je n'ai mis en œuvre qu'une partie de la puissance dont je pouvais disposer pour les produire.

voici qui remplit le récipient; et plusieurs d'entre vous peuvent voir que, en le traversant, la lumière fait naître, au sein du nuage, des auréoles colorées semblables à celles qu'on observe

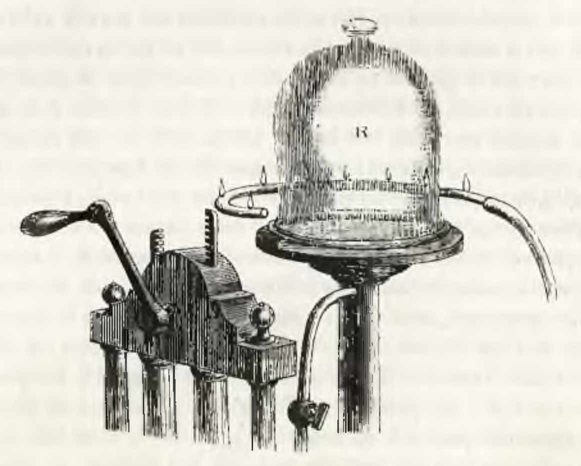


Fig. 14.

quelquefois sur une large échelle, autour de la lune. Lorsque je le fais rentrer, l'air échauffe le récipient exactement comme dans l'expérience avec notre tube de fer-blanc; le nuage s'évanouit, et l'air intérieur du récipient reprend sa parfaite transparence Je fais pomper de nouveau, et le nuage se reforme; l'air entre encore, et le nuage disparaît, la chaleur développée étant plus que suffisante pour le maintenir à l'état de pure vapeur.

Sir Humphry Davy renvoie, dans sa « Philosophie chimique, » à la célèbre machine de Schemnitz, en Hongrie, dans laquelle l'air est comprimé par une colonne d'eau de 80 mètres de hauteur. Lorsqu'on ouvre un robinet pour permettre à l'air de s'échapper, il se produit un froid qui, non-seulement précipite la vapeur dissoute dans l'air, mais la force à se congeler sous forme de pluie de neige, tandis que le tube d'où l'air s'échappe se couvre de glaçons. « Le docteur Darwin, écrivait Davy, a expliqué ingénieusement l'apparition de la neige sur les sommets des plus

hautes montagnes, par la précipitation des vapeurs de l'air raréfié qui s'élève des plaines et des vallées. Les Andes situées presque sous la ligne, s'élèvent du sein d'une plaine de sables brûlants; vers la moitié de leur hauteur la température est douce et très-agréable, tandis que les sommets sont couverts de neiges immobiles et éternelles. »

Je passe à une autre expérience, dans laquelle la chaleur, pour plusieurs d'entre vous, semblera produite par quelque agent mystérieux; et, de fait, les plus habiles d'entre nous savent, à ce sujet, bien peu de chose. Il s'agit presque de développer de la chaleur par le frottement *contre le pur espace*. Cette chaleur, en effet, est due peut-être, ou mieux, très-probablement, à une sorte de frottement contre ce milieu intra-stellaire auquel nous aurons à faire appel de plus en plus, à mesure que nous avancerons.

J'ai ici une masse de fer, portion d'un chaînon d'un câble énorme, enveloppée de tours nombreux d'un fil de cuivre, (fig. 15), et que je puis convertir instantanément en un fort aimant, en faisant passer un courant électrique à travers le fil. Vous voyez, lorsqu'il est ainsi excité, combien cet aimant est puissant. Cette armature s'y attache avec force, et ces ciseaux, ces vis, ces aiguilles s'attachent à leur tour à l'armature. Tourné sens dessus dessous, cet aimant porterait à chacun de ses pôles un poids de cinquante kilogrammes, auquel on pourrait peut-être ajouter la personne la plus lourde de cette salle. A un signal donné, mon aide interrompra le courant électrique : — « Rompez! » Le fer tombe, et toute la magie disparaît : l'aimant est maintenant du fer ordinaire. A ses deux extrémités, je place deux armatures en fer doux P, P, deux pôles mobiles, comme on les appelle, que je puis écarter à la distance voulue l'un de l'autre, quand l'aimant n'est pas excité. Lorsque le courant passe, ces morceaux de fer sont virtuellement des parties constitutives de l'aimant. Je place entre elles une substance que l'aimant, lors même qu'il exerce sa plus grande force, est impuissant à attirer. Cette substance est simplement une pièce, une médaille d'argent. Je l'approche de l'aimant excité, elle n'est nullement attirée. En effet, la faible

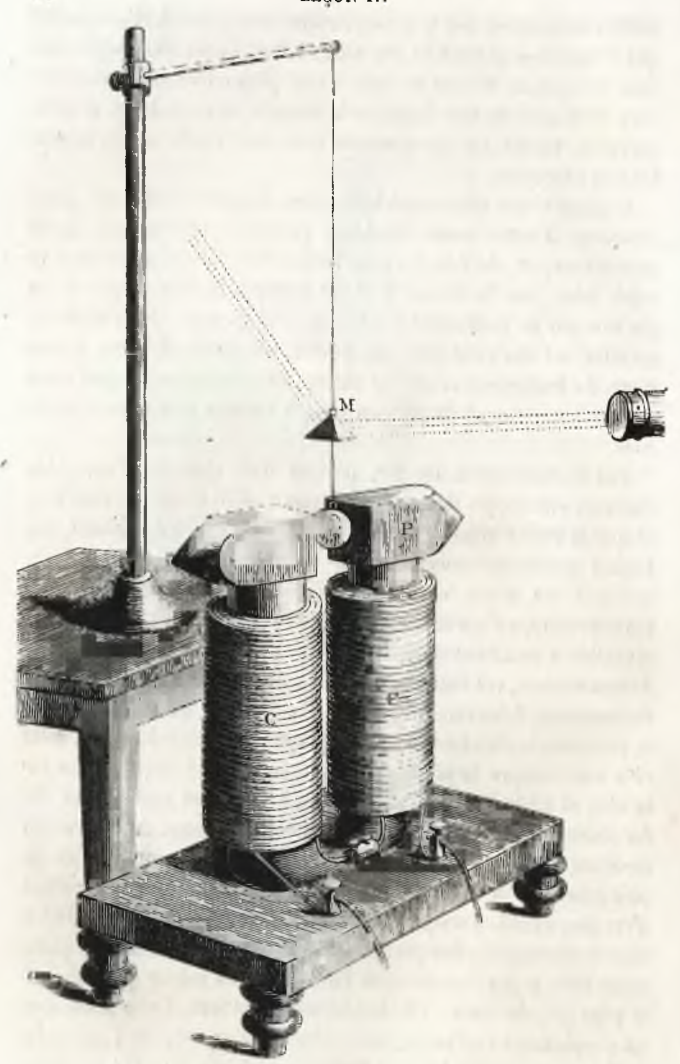


Fig. 15.

action que l'aimant exerce réellement sur l'argent est répulsive et non attractive, et elle est si petite qu'elle est insensible dans des expériences telles que nous les faisons en ce moment. Eh bien, je suspends cette médaille entre les pôles P, P, de l'aimant, et je le rends actif en faisant passer le courant; la médaille, suspendue comme vous le voyez, n'est ni attirée ni repoussée; mais, si je cherche à la mouvoir, j'éprouve une certaine résistance qu'il faut vaincre pour la faire tourner; elle se comporte comme elle le ferait si elle était plongée dans un fluide visqueux. Ce curieux effet peut être rendu plus manifeste encore de cette manière. J'ai ici une plaque rectangulaire de cuivre, et si je la fais aller et venir rapidement entre les pôles, comme on le fait d'une scie, il il me semble, quoique je n'aperçoive rien, que je coupe une masse de fromage ou de beurre [1]. Rien de pareil ne se manifeste quand l'aimant n'est pas actif; la lame de cuivre ne rencontre alors que la résistance infiniment petite de l'air. A la distance où vous êtes, vous avez été obligés de me croire sur parole; mais j'ai disposé une expérience qui rendra manifeste à tous les yeux cette étrange action de l'aimant sur la médaille d'argent.

Au-dessus de la médaille, en suspension et attachée à elle par un bout de fil, j'ai disposé une pyramide réfléchissante M, formée de quatre fragments triangulaires de miroirs; la médaille et le réflecteur sont suspendus ensemble par un fil qui a été tordu dans sa préparation, et qui se détordera lui-même lorsque le poids qu'il soutient sera rendu libre. Je place notre lumière électrique de manière qu'elle lance un vif rayon de lumière sur cette petite pyramide, et vous voyez une longue traînée de lumière traverser l'air chargé de poussière. Si je déplace la pyramide, vous voyez le rayon qui traverse la salle se déplacer à son tour pour aller frapper une autre portion de la muraille blanche. Lorsque le miroir commence à tourner, le faisceau de lumière se meut, d'abord lentement, allant du mur au plafond. Mais le mouvement s'anime, et maintenant vous ne pouvez plus discerner les déplacements des faisceaux lumineux; au lieu de fais-

[1] Expérience de Faraday.

ceaux successifs vous avez une bande lumineuse splendide de plus de 8 mètres de diamètre projetée sur le mur par la rotation rapide des rayons réfléchis. A mon commandement l'aimant sera rendu actif, et le mouvement de la médaille sera immédiatement éteint. — « Agissez ! » Voyez l'effet : la médaille paraît frappée de mort par l'excitation de l'aimant, la bande disparaît subitement, et vous n'avez plus sur le mur qu'une simple tache lumineuse. Cet étrange effet mécanique est produit sans aucun changement visible dans la distance entre les deux pôles. Regardez attentivement le mouvement lent de l'image sur le mur : la tension du fil tordu se débat contre un antagonisme invisible et produit les faibles oscillations que vous voyez. Elles sont ce qu'elles seraient, si la médaille, au lieu d'être environnée d'air, était plongée dans un pot de mélasse épaisse. Je détruis la puissance magnétique, et le caractère visqueux de l'espace compris entre les pôles disparaît à l'instant. La médaille recommence à tourner comme auparavant, et voici la bande lumineuse qui reparaît. J'excite de nouveau l'aimant; la médaille redevient immobile et la bande disparaît.

Par la force de ma main je puis vaincre cette résistance et faire tourner la médaille; mais pour y parvenir, il faut que je dépense de la force. Que devient cette force? Elle est convertie en chaleur. Forcée à tourner, la médaille s'échauffe. Beaucoup d'entre vous connaissent la grande découverte de Faraday, que des courants électriques sont engendrés dans un corps conducteur de l'électricité mis en mouvement entre les pôles d'un aimant. Ces courants électriques sont, sans aucun doute, présents dans notre expérience et suffisent à échauffer la médaille. Mais que *sont* ces courants? Quelles relations, ont-ils avec l'espace compris entre les pôles magnétiques? Et avec la force dépensée par mon bras dans leur génération? Nous ne le savons pas maintenant, mais nous le saurons tout à l'heure. L'expérience ne perdra rien de son intérêt si la force de mon bras, avant d'apparaitre sous forme de chaleur, se montre sous une autre forme, sous forme d'électricité. Le résultat final est le même; la chaleur développée ultérieurement est l'équivalent exact de la quantité

de force requise pour mouvoir la médaille dans le champ magnétique excité.

Je tiens à mettre actuellement en évidence le développement de chaleur né de cette action magnétique. J'ai ici un cylindre métallique solide, dont toutefois l'intérieur est composé d'un métal plus fusible que celui de son enveloppe extérieure. Celle-ci est de cuivre, et elle est remplie par un alliage dur, mais très-fusible. Je place ce cylindre verticalement entre les pôles coniques PP (fig. 16) de l'aimant. Une corde SS va du cylindre à

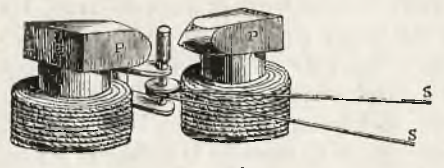


Fig. 16.

une roue, et en mettant celle-ci en mouvement on fait tourner le cylindre. Il tournerait indéfiniment, aussi longtemps que l'aimant ne sera pas rendu actif, sans produire l'effet cherché; mais dès que l'aimant sera devenu actif, j'espère que le mouvement de rotation développera une quantité de chaleur suffisante pour fondre le noyau intérieur du cylindre, et si je réussis, je verserai le métal liquide devant vous. Deux minutes suffiront pour cette expérience. Le cylindre tourne maintenant, et son orifice supérieur est ouvert. Je le laisserai ainsi ouvert jusqu'à ce que le métal devenu liquide éclabousse visiblement les pôles de l'aimant. Une minute s'est à peine écoulée, et j'ai déjà aperçu la lave métallique. J'arrête maintenant le mouvement pour un moment, et je ferme l'extrémité du cylindre pour empêcher le métal de se répandre. Laissons l'action se continuer pendant une demi-minute encore; la masse entière de l'intérieur, j'en suis persuadé, est maintenant fondue. J'enlève le cylindre, j'ôte le bouchon, et voici le métal liquéfié que je verse sous vos yeux [1].

[1] Le développement de la chaleur au sein d'un corps conducteur que l'on fait tourner entre les pôle d'un aimant a été signalé pour la première fois par M. Joule (*Phil. mag.*, vol. XXIII, 3e série, année 1843, p. 355 et 439);

Il est temps maintenant d'étudier de plus près que nous ne l'avons fait jusqu'ici le rapport de la chaleur développée par une action mécanique à la force qui l'a engendrée. Sans doute que cette relation se révéla indécise à plusieurs esprits avant de recevoir un énoncé distinct, ou d'être démontrée expérimentalement. Ceux qui réfléchissent aux opérations de la vie, aux changements qui surviennent au sein des corps animés, aux rapports qui lient à la force musculaire les forces en puissance dans les aliments, sont naturellement enclins à admettre une dépendance mutuelle entre ces forces de genre différents. Il n'y a donc pas lieu d'être surpris que l'homme qui, le premier, vit surgir très-clairement dans son esprit l'idée d'équivalence, entre la chaleur et l'énergie mécanique, ait été un médecin, le docteur Mayer, de Heilbronn, en Allemagne. Il formula le premier le rapport intime et rigoureux qui lie entre eux la chaleur et le travail, donna le nombre admis universellement aujourd'hui comme *équivalent mécanique de la chaleur*, et suivit ce nouveau principe jusque dans ses applications les plus audacieuses [1].

C'est néanmoins à M. Joule, de Manchester, que revient presque en entier l'honneur d'avoir traité expérimentalement ce sujet si important. Indépendamment tout à fait de Mayer, l'esprit fortement arrêté sur un principe dont la généralité l'avait vivement frappé, et sans se laisser décourager par la froideur avec laquelle ses premiers travaux semblaient avoir été reçus, il poursuivit pendant plusieurs années la démonstration de l'invariabilité du rapport qui lie entre elles la chaleur et la force mécanique ordinaire. Il mit de l'eau dans un vase convenable, l'agita par l'intermédiaire d'aubes mues par des forces mesurables, et détermina à la fois la quantité de chaleur développée par l'agitation du liquide et la quantité de travail dépensée dans cette opération. Il fit la même chose avec du mercure et avec de l'huile de baleine. Il fit aussi frotter l'un contre l'autre

et cette expérience a été ensuite renouvelée sous une forme frappante par M. Foucault. L'artifice décrit ci-dessus, consistant à faire fondre l'intérieur du cylindre, fait de l'expérience théorique une brillante expérience de cours.

[1] Voyez les leçons III et XII.

des disques en fonte de fer, et mesura la chaleur produite par leur frottement, ainsi que la force dépensée pour le vaincre. Il fit encore passer avec force de l'eau à travers des tubes capillaires, et détermina la quantité de chaleur engendrée par le frottement du liquide contre les parois des tubes. Le résultat de ces expériences, qui excluent jusqu'à l'ombre même du doute, est que, dans toutes ces circonstances, la quantité de chaleur engendrée par une même quantité de forces est fixe et invariable. Une quantité donnée de force, employée à faire tourner les disques de fer l'un contre l'autre, produit précisément la même quantité de chaleur que lorsque ce même travail mécanique est dépensé à agiter de l'eau, du mercure ou de l'huile de baleine. Naturellement, dans ces diverses expériences, les températures finales étaient très-différentes : celle de l'eau, par exemple, était le trentième de celle du mercure, parce que, comme nous le savons déjà, la capacité de l'eau pour la chaleur est trente fois celle du mercure. M. Joule tint compte de ces différences dans la discussion de ses expériences ; et trouva, comme je l'ai déjà dit, que, quelque différentes que soient les températures finales, par suite des différences entre les capacités pour la chaleur des substances sur lesquelles on opère, la quantité de chaleur née d'une même dépense de force est constante et constamment la même dans tous les cas.

On a trouvé, de cette manière, que la quantité de chaleur qui élèverait d'un degré Fahrenheit la température d'une livre d'eau est exactement égale à celle qui serait engendrée par un poids d'une livre tombé d'une hauteur de 772 pieds, et dont la vitesse acquise serait subitement éteinte par son choc contre la terre. Réciproquement, la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'une livre d'eau suffirait, si elle était appliquée mécaniquement, sans perte aucune, pour élever un poids d'une livre à la hauteur de 772 pieds ou un poids de 772 livres à la hauteur d'un pied. On a eu recours à une expression nouvelle, *pied-livre*, pour exprimer convenablement l'acte d'élever un poids d'une livre à la hauteur d'un pied. Ainsi, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la tempéra-

ture d'une livre d'eau étant prise pour unité, l'*équivalent mécanique* de la chaleur sera égal à 772 pieds-livres [1].

Afin de bien représenter à votre esprit l'effet calorifique produit par la chute d'un corps, je vais réaliser l'expérience de faire tomber une balle de plomb du plafond de cette salle sur le plancher. La balle de plomb est en ce moment un peu plus froide que l'air de cette salle. Je le prouve en la mettant en contact avec la pile thermo-électrique, et en vous montrant que la déviation de l'aiguille accuse du froid. Ici, sur le plancher, j'ai placé une plaque de fer sur laquelle je veux que la balle tombe, et ce fer, comme vous le voyez, est aussi plus froid que l'air de la salle. Sur le toit j'ai installé un aide qui élèvera la balle après que je l'aurai attachée à ce fil. Il ne touchera pas la balle et il ne la laissera toucher à aucun autre objet. Il l'abandonne maintenant à elle-même ; elle tombe et elle est reçue par la plaque de fer. La hauteur est trop petite pour que nous obtenions beaucoup de chaleur par une seule chute ; je vais donc faire remonter la balle et la faire tomber trois ou quatre fois successivement. Remarquez que la balle est attachée à une certaine longueur de fil recouvert de soie, et que je la soulève à l'aide de ce fil pour que ma main n'en approche jamais. Voici le quatrième choc qu'elle subit, et je pense que je puis maintenant éprouver la température du plomb. Je place de nouveau sur la pile la balle qui était froide au commencement ; la déviation immédiate de l'aiguille dans le sens opposé montre que maintenant la balle est devenue chaude, et cette chaleur est due entièrement à la destruction de la quantité de mouvement que la balle possédait lorsqu'elle a frappé la plaque de fer. Dans notre théorie, le mouvement de transport commun à la masse entière de la balle est devenu un mouvement individuel des atomes de cette masse, et constitue le mode d'agitation que nous désignons du nom de chaleur.

[1] En France, on appelle kilogrammètre et l'on désigne par $k\ m$ le travail nécessaire et suffisant pour élever un kilogramme à un mètre de hauteur. L'équivalent mécanique de la chaleur est alors de 424 kilogrammètres ; c'est-à-dire que la chaleur suffisante à élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau équivaut à une force capable d'élever 424 kilogrammes à un mètre de hauteur, et réciproquement.

Quelle a été la quantité totale de chaleur ainsi engendrée? L'espace parcouru en tombant, par la balle, dans chaque expérience, est de 7 mètres, et la chaleur engendrée est proportionnelle à la hauteur de chute. Cela posé, une balle de plomb, en tombant d'une hauteur de 424 mètres engendrerait une chaleur suffisante pour élever sa propre température de 30°, puisque sa capacité calorifique est le trentième de celle de l'eau. Dans sa chute de 7 mètres, qui est en nombre rond le soixantième de 424, la chaleur engendrée, si elle était tout entière concentrée dans le plomb, aurait élevé sa température d'un demi-degré. Telle est la quantité de chaleur engendrée par une seule chute de la balle; et quatre fois cette somme serait naturellement la chaleur engendrée par quatre chutes successives. Mais la chaleur n'est pas concentrée tout entière dans la balle; elle est partagée entre la balle et le fer sur lequel elle est tombée.

Il est inutile de dire que si le mouvement était communiqué à un corps par d'autres moyens que la gravité, la destruction de ce mouvement produirait aussi de la chaleur. Lorsqu'un boulet de canon frappe un but, il est fortement échauffé, et la théorie de l'équivalent mécanique de la chaleur nous met à même de calculer, avec la plus grande exactitude, la quantité de chaleur engendrée par le boulet, lorsque sa vitesse est connue. C'est un point digne de toute notre attention, et, en le traitant, je veux m'adresser à ceux-là mêmes de mes auditeurs qui ignorent les éléments de la mécanique. Chacun sait que plus la hauteur d'où tombe un corps est grande, plus est grande aussi la force avec laquelle il frappe la terre, et que ce choc plus violent est dû uniquement à la vitesse plus grande acquise par la balle qui tombe d'une plus grande hauteur. La vitesse acquise par le corps n'est pas, toutefois, proportionnelle à la hauteur dont il tombe. Si la hauteur est quadruple, la vitesse est seulement double; si la hauteur est neuf fois plus grande, la vitesse est triple; si la hauteur est seize fois plus grande, la vitesse est quadruple; plus généralement, la hauteur croît proportionnellement au carré de la vitesse.

Mais la chaleur engendrée par le choc d'un corps qui tombe

croît proportionnellement à la simple hauteur, et, par conséquent, aussi proportionnellement au carré de la vitesse.

Si donc nous doublons la vitesse d'un projectile, nous quadruplerons la chaleur engendrée dans l'extinction de son mouvement; si nous triplons la vitesse, nous rendrons la chaleur neuf fois plus grande; si nous quadruplons la vitesse, nous rendrons la chaleur seize fois plus grande.

La vitesse communiquée par la pesanteur à un corps qui tombe de 424 mètres est, en nombre rond, de 91 mètres par seconde, c'est-à-dire que telle est la vitesse acquise au moment où le corps frappe la terre. Cinq fois cette quantité, ou 455 mètres par seconde, ne seraient pas une vitesse extraordinaire pour une balle de carabine rayée.

Mais une balle de carabine en plomb, qui se mouverait avec une vitesse de 91 mètres par seconde, engendrerait en frappant le but une quantité de chaleur qui, en la supposant toute concentrée dans la balle, élèverait sa température de 30°. Avec 5 fois cette vitesse, elle engendrerait 25 fois cette même quantité de chaleur, c'est-à-dire que 25 fois 30, ou 750 degrés, représenteraient l'élévation de température d'une balle de carabine frappant le but avec une vitesse de 455 mètres par seconde, si toute la chaleur restait à la balle. Cette quantité de chaleur serait beaucoup plus que suffisante pour fondre le plomb ; mais, en réalité, une partie seulement de la chaleur engendrée reste dans la balle; le but en prend sa part. Si la balle était de fer au lieu d'être de plomb, la chaleur engendrée dans ces mêmes conditions suffirait à élever la température de la balle du tiers seulement de 750°, ou de 250°, parce que la capacité du fer pour la chaleur est trois fois environ celle du plomb.

D'après ces considérations, il est clair, ce me semble, que si nous connaissions la vitesse et le poids d'un projectile, nous pourrions calculer, sans peine, la quantité de chaleur développée par l'extinction de sa force motrice. Par exemple, connaissant le poids de la terre, comme nous le connaissons, et la vitesse avec laquelle elle se meut dans l'espace, un simple calcul nous donnerait la quantité exacte de chaleur qui naîtrait si la terre était

arrêtée brusquement dans son orbite, le nombre de degrés, par exemple, que cette quantité de chaleur communiquerait à un globe d'eau d'un volume égal à celui de la terre. Mayer et Helmholtz ont fait ce calcul, et ils ont trouvé que la quantité de chaleur engendrée par ce choc colossal suffirait non-seulement pour fondre la terre entière, mais pour la réduire, en grande partie, en vapeur. Ainsi, le seul arrêt brusque de la terre dans son orbite amènerait les éléments à l'état de fusion par une chaleur ardente. Et si, après l'extinction de son mouvement, la terre, comme il arriverait nécessairement, allait tomber sur le soleil, la quantité de chaleur engendrée par ce nouveau choc serait égale à la chaleur développée par la combustion de 1 600 globes de charbon solide, égaux en volume à la terre.

Les connaissances que vous venez d'acquérir ont conduit divers savants à méditer sur la manière dont le soleil est alimenté ou sur les moyens par lesquels sa provision de chaleur et de lumière est conservée ou entretenue, à supposer que cette chaleur et cette lumière sont engendrées par la chute de masses météoriques qui viendraient périodiquement perdre leur vitesse à la surface du soleil [1]. Quelques-uns de ces savants croient que la lumière zodiacale est une nuée d'aérolithes ou de petits corps, et que c'est d'elle que peuvent provenir les pluies de matières météoriques tombant sur le soleil. Or, quelle que soit en elle-même la valeur de cette hypothèse, force est d'admettre que ces chutes périodiques de matières ou météores suffiraient réellement à produire et à entretenir la chaleur et la lumière solaires. Je n'ai pas à donner mon opinion sur la vérité ou la fausseté, non plus que sur la probabilité de cette théorie; il me suffira de dire qu'elle met en jeu une cause capable, si elle opérait sur une échelle suffisante, de produire réellement l'effet qu'on lui attribue. Passons maintenant du soleil à quelque chose de moindre, ou plutôt élançons-nous d'un seul bond au pôle opposé de la na-

[1] Mayer proposa cette hypothèse en 1848, et l'exposa complétement. Elle fut ensuite énoncée indépendamment par M. Waterston, et développée par le professeur William Thomson (*Transactions of the Royal Soc. of Edinb.*, 1855). Voyez leçon XII.

ture. Ici cette puissance divine de l'esprit humain, qui sait faire abstraction des grandeurs en elles-mêmes, pour ne considérer que les rapports ou les lois, s'exercera d'une manière très-remarquable. Notre raisonnement s'applique non-seulement au soleil et aux planètes, mais aux divers atomes dont la matière est formée. Beaucoup d'entre vous connaissent l'histoire scientifique du diamant, dont Newton, devançant par son génie les découvertes de la chimie moderne, prononça que c'était une substance grasse ou combustible. Chacun maintenant sait que cette brillante pierre précieuse est identique dans sa composition avec le charbon de bois commun, le graphite ou la plombagine. Un diamant est du carbone pur, et le carbone brûle dans l'oxygène. J'ai ici un diamant, placé dans une petite corbeille de fil de platine ; je vais le chauffer au rouge au sein de cette flamme, et je le plongerai ensuite dans ce flacon plein de gaz oxygène. Voyez comme il s'illumine en entrant dans le flacon d'oxygène, il brille comme une petite étoile terrestre, d'une lumière éclatante et d'un blanc pur. Quelle idée nous formerons-nous de l'action dont nous sommes les témoins ? Exactement celle que faisaient naître dans notre esprit les météores tombant sur le soleil. Ces deux idées sont en réalité les mêmes ; et pour l'intelligence, l'une n'est pas plus difficile que l'autre. Vous avez à vous figurer les molécules de l'oxygène tombant de tous les côtés comme une pluie sur le diamant. Elles sont entraînées vers lui par ce qu'on appelle affinité chimique, force qui, ramenée à sa conception la plus simple, se présente à l'esprit comme une pure attraction, de même qualité mécanique, si je puis me servir de cette expression, que la gravité. Chaque atome d'oxygène, lorsqu'il rencontre l'atome de carbone et que son mouvement de translation est anéanti par le choc, prend cette autre forme de mouvement que nous appelons chaleur. Cette chaleur est si intense, les attractions exercées à ces distances moléculaires sont si puissantes, que le diamant est maintenu à la chaleur blanche, pendant que le composé formé par l'union des atomes de carbone et d'oxygène, l'acide carbonique, se dégage et s'enfuit.

Passons maintenant du diamant à la flamme ordinaire. J'ai ici

un bec dont je puis faire jaillir un jet de gaz enflammé. Voici la flamme : quelle est sa constitution? Nous avons à l'intérieur de la flamme un noyau de gaz pur, non brûlé, et en dehors, tout alentour, l'oxygène de l'air. La surface externe du noyau de gaz est en contact avec l'air ; c'est là que les atomes se heurtent les uns contre les autres et produisent par leur choc lumière et chaleur. La constitution intime de la flamme est très-digne d'une attention spéciale, et nous sommes redevables de la connaissance que nous en avons à l'une des plus belles recherches de Davy. Le gaz de la houille est ce que nous pouvons appeler un hydrocarbure ; il est formé de carbone et d'hydrogène chimiquement unis. De ce gaz transparent s'échappent la suie et le noir de fumée, que nous apercevons lorsque sa combustion est incomplète. Cette suie et cette fumée, qui sont alors sous leur forme naturelle, s'unissent à d'autres substances lorsque la combustion est complète, et reprennent une forme transparente. Nous avons donc dans le jet de gaz une surface de gaz composé en contact avec l'oxygène de l'air. Nous y avons mis le feu, et les attractions sont devenues tout à coup si intenses que le gaz a éclaté en flamme. L'oxygène a à choisir entre deux partenaires, ou, si vous l'aimez mieux, il est en présence de deux ennemis, et il se prendra corps à corps avec celui qui lui convient le mieux, ou qu'il hait le plus cordialement, suivant le cas. Il s'attaque d'abord à l'hydrogène, et met le carbone en liberté. Les particules solides du carbone, ainsi éparpillées en nombre innombrable au sein du gaz enflammé, deviennent fortement incandescentes; elles atteignent la chaleur blanche, et c'est principalement à elles qu'est dû l'éclat de nos lumières artificielles. Ce carbone, cependant, quand le moment sera venu, s'attaquera à son tour à l'oxygène pour devenir ou tendre à devenir de l'acide carbonique. C'est en passant de l'hydrogène, avec lequel il était d'abord combiné, à l'oxygène auquel il s'unit définitivement, alors qu'il est seul et redevenu célibataire, qu'il nous donne toute la splendeur de sa lumière.

La combustion d'une bougie ou chandelle est, en principe, la même que celle d'un jet de gaz. Voici un bâton de cire ou de

suif (fig. 17), traversé par une mèche de coton. Vous enflammez la mèche ; elle brûle, le suif se fond à sa base ; ce suif fondu monte dans la mèche en vertu de l'attraction capillaire ; il est converti en vapeur par la chaleur, et cette vapeur est un hydrocarbure qui brûle exactement comme le gaz. Vous avez donc partout, à l'intérieur de la vapeur non brûlée, au dehors de l'air commun, et entre la vapeur et l'air une couche neutre, sorte de champ de bataille des atomes en collision, où ils se choquent, et développent en se choquant de la lumière et de la chaleur. Il serait difficile de trouver dans la nature quelque chose de plus admirable qu'une bougie allumée : le bassin creux partiellement rempli de matière fondue à la base de la mèche ; la fusion lente du liquide ; sa vaporisation ; la structure de la flamme ; sa forme élancée se terminant en pointe ; l'air qui afflue pour pourvoir à son entretien ; sa beauté, son éclat, sa mobilité, en ont fait le type favori des êtres éthérés ; et la dissection que Davy en a faite, loin de diminuer le plaisir avec lequel nous la regardons, en a fait plus que jamais, pour les esprits éclairés, une merveille de beauté incomparable.



Fig. 17.

J'en ai dit assez pour que vous puissiez vous former une idée nette de la structure de la flamme d'une bougie. Vous voyez le noyau non brûlé à l'intérieur et la couche enflammée qui l'enveloppe. Du noyau et à travers la couche, les principes constituants de la bougie s'échappent et vont se perdre dans l'air environnant. La flamme d'une bougie est un cône creux de matière brûlante. Dans votre pensée, coupez horizontalement ce cône lumineux, la section sera un anneau enflammé. Voici un moyen pratique de réaliser la section transversale de la flamme d'une bougie. J'ai ici un morceau de papier blanc que je vais

abattre sur la bougie ; je l'approche de la flamme jusqu'à ce qu'il touche presque la mèche. Regardez la surface supérieure de ce papier : elle est carbonisée, mais comment ? En parfaite correspondance avec le cercle de feu de la flamme, remplacé sur le papier par un cercle de charbon (fig. 18).

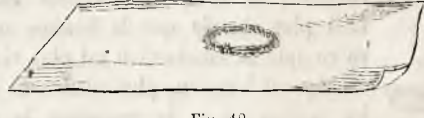


Fig. 18.

On peut opérer de la même manière avec un jet de gaz. Je le fais. Voici la section obtenue. Vous voyez qu'à l'intérieur de l'anneau le papier n'est pas carbonisé ; c'est qu'à cet endroit la vapeur non brûlée de la chandelle, ou le gaz non brûlé du jet, sont en contact avec la surface du papier, sans pouvoir la charbonner.

C'est donc à la présence de particules solides de charbon qu'est due principalement l'éclat de nos lumières. Mais la présence de ces particules, à l'état isolé, suppose l'absence de l'oxygène, qui s'en emparerait s'il était là. Si au moment où elles échappent à l'hydrogène avec lequel elles étaient d'abord combinées, l'oxygène était là pour les saisir, leur célibat cesserait, et la lumière perdrait tout son éclat. Aussi, lorsque nous ajoutons une quantité suffisante d'air au gaz qui s'échappe d'un bec ; lorsque nous faisons pénétrer cet air de telle sorte que son oxygène atteigne le centre même de la flamme, sa lumière est presque entièrement éteinte. Le brûleur que je vous présente a été imaginé par M. le professeur Bunsen, dans le but spécial d'empêcher la production de la lumière, en déterminant la combustion subite des particules de carbone. Le bec d'où le gaz s'échappe entre dans un tube percé de trous presque au niveau de l'orifice du gaz ; on fait sortir par ces trous de l'air qui se mêle intimement au gaz ; le mélange d'air et de gaz s'échappe par le sommet du tube. Le brûleur est représenté (fig. 19). Le gaz arrive dans la chambre percée de trous *a* où l'air se mêle à

lui ; mêlés, le gaz et l'air montent ensemble dans le tube *a b* ; *d* est un bec en rose qui sert à faire varier la forme de la flamme. J'ai allumé le mélange, mais c'est à peine si l'on aperçoit la lumière produite, tant elle est faible ; la chaleur est ici ce que l'on cherche ; et cette flamme sans lumière est bien plus chaude que la flamme ordinaire, parce que la combustion est plus vive et par conséquent beaucoup plus intense. Si je bouche les orifices en *a*, je supprime la provision d'air, et la flamme devient tout à coup lumineuse ; nous sommes revenus au cas ordinaire d'un noyau de gaz non brûlé, entouré d'une gaîne de flamme. En réalité, le pouvoir éclairant du gaz peut se mesurer par la quantité d'air qu'il faut lui ajouter pour empêcher la précipitation des particules solides de carbone ; plus le gaz sera riche, plus il faudra d'air pour brûler son carbone et éteindre sa lumière.



Fig. 19.

On peut faire, dans les rues de Londres, presque tous les samedis, quand le vent souffle, une observation intéressante : l'extinction soudaine et presque totale des grands jets de gaz qui illuminent les étalages des bouchers. Mécaniquement poussé par le vent, l'oxygène pénètre jusqu'au cœur de la flamme, et la lumière blanche passe instantanément à l'état de lueur bleue ou comme sépulcrale ; ce même effet se produit dans les illuminations publiques. Comme dans le bec de Bunsen, l'absence de lumière est due à la présence d'une quantité d'oxygène suffisante pour brûler instantanément le carbone libre de la flamme.

Déterminer l'influence de la hauteur sur la vitesse de la combustion, était un des problèmes que je m'étais posés dans mon excursion sur les Alpes en 1859. Heureusement pour la science, je priai M. le docteur Frankland de m'accompagner et de me remplacer dans les expériences sur la combustion, me réservant les observations sur la radiation solaire. La méthode suivie fut celle-ci : Six bougies furent achetées à Chamounix et soigneusement pesées ; on les fit brûler pendant une heure dans l'hôtel de l'Union, et on détermina la perte de poids qu'elles avaient

subie. Ces mêmes bougies furent portées au sommet du Mont Blanc; et, dans la matinée du 21 août, on les fit brûler pendant une heure sous une tente qui les mettait parfaitement à l'abri de l'influence du vent. L'aspect des six flammes qu'elles donnaient à cette hauteur si grande nous surprit tous les deux. Elles semblaient n'être qu'un reflet éteint des flammes que les mêmes bougies donnaient dans la vallée de Chamounix. Pâles, petites, faibles, elles accusaient une énergie de combustion grandement diminuée. Nous pesâmes les bougies avec soin à notre retour, et nous vîmes se révéler ce fait inattendu que la quantité de stéarine consumée en haut était presque la même que celle qui avait été consumée en bas. Ainsi, quoique le pouvoir éclairant de la flamme fût diminué dans une proportion extraordinaire par l'élévation, l'énergie de la combustion était restée la même. Ce résultat curieux s'explique principalement par la subtilité et la mobilité de l'air à cette grande hauteur. Les particules d'oxygène pénètrent au sein de la flamme avec une liberté relativement plus grande et font diminuer la lumière, parce que la promptitude de leur action supplée à leur petit nombre.

M. le docteur Frankland a fait de ces expériences le point de départ d'un travail très-intéressant [1]. Il montre que la quantité de bougie consumée dans un temps donné est, entre de larges limites, indépendante de la densité de l'air. La raison en est, qu'en même temps que par la compression de l'air nous augmentons le nombre des particules actives en contact avec la flamme, nous diminuons presque dans la même proportion leur mobilité, de sorte que la combustion est à peine plus active. En outre, lorsqu'un excès d'air entoure la flamme, son effet refroidissant tend à prolonger l'existence des particules de carbone à l'état solide, et même à empêcher leur combustion finale. Une des plus belles expériences de M. le docteur Frankland consiste à montrer qu'en conduisant l'air autour de la flamme pâle et sans fumée d'une lampe à l'esprit-de-vin, on peut d'abord donner à cette flamme l'éclat de celle du gaz d'éclairage ; puis, si l'on

[1] *Transactions philosophiques* pour 1861.

augmente assez la condensation de l'air, faire fumer cette flamme, parce que, devenu paresseux, l'oxygène ne suffira plus à la combustion complète du carbone.

Mais pour en revenir à notre théorie de la combustion, c'est aux chocs mutuels de l'oxygène de l'air et des principes constituants de notre gaz et de nos bougies qu'est due la lumière et la chaleur de nos flammes. Je projette dans cette flamme de la limaille d'acier, et vous voyez que la combustion du métal donne naissance à des scintillations en forme d'étoiles. L'acier est d'abord échauffé jusqu'à ce que l'attraction mutuelle entre lui et l'oxygène suffise à déterminer leur combinaison. Ces éclairs, qui rappellent les feux des fusées, sont le résultat de leur collision. C'est en s'élançant les uns contre les autres que les atomes d'oxygène et de soufre produisent la flamme qu'on observe quand on brûle du soufre dans l'oxygène ou dans l'air ; c'est encore du choc mutuel des atomes de l'oxygène et du phosphore que naissent la chaleur intense et la lumière éblouissante de la combustion du phosphore dans le gaz oxygène. C'est du choc du chlore et de l'antimoine que jaillissent la lumière et la chaleur qu'on observe quand ces corps sont mêlés ensemble ; c'est le choc du soufre et du cuivre qui détermine l'incandescence de la masse, lorsque ces substances sont chauffées ensemble dans un ballon. En un mot, tous les cas de combustion peuvent et doivent trouver leur explication dans le conflit, dans le choc d'atomes entraînés l'un contre l'autre par leurs attractions mutuelles.

APPENDICE A LA LEÇON II

—

EXTRAITS DU VINGTIÈME APHORISME DU SECOND LIVRE DU « NOVUM ORGANUM DE BACON »

Ce que nous disons ici du mouvement, à savoir, qu'il est à la chaleur comme le genre est à l'espèce, doit être entendu, non pas en ce sens que la chaleur engendre le mouvement ou que le mouvement engendre la chaleur (quoique dans certains cas l'un et l'autre soient vrais), mais en ce sens que la chaleur, en ce qui la constitue, ou en d'autres termes, que l'*essence même* de la chaleur, c'est le mouvement et rien autre chose; mais le mouvement, limité par certaines *différences* que nous déterminerons un peu après, quand nous aurons indiqué quelques précautions utiles pour lever toute équivoque.

. . . .

La communication de la chaleur, ou sa nature transitive, en vertu de laquelle une substance approchée d'un corps chaud s'échauffe, ne doit pas être confondue avec la forme ou l'essence du calorique. Être chaud, être échauffant, ce sont deux choses distinctes. Car, au moyen du frottement, vous produisez la chaleur sans le secours d'une substance déjà chaude.

. . . .

La chaleur, c'est le mouvement *expansif* par lequel le corps tend à se dilater, et à occuper une plus grande sphère ou un plus grand espace qu'il ne faisait auparavant.

Cette différence se voit surtout dans la flamme, où la vapeur, c'est-à-dire l'exhalaison grasse, se dilate manifestement et fait explosion en flamme.

Elle se voit dans tout liquide chauffé, qui manifestement se gonfle, monte, envoie des bulles et poursuit le cours de sa dilatation, jusqu'à

ce qu'il soit changé en un corps beaucoup plus rare et diffus que les liquides, à savoir, une vapeur, une fumée, un air.

. . . .

Troisième différence : La chaleur est un mouvement expansif, non pas d'ensemble et de la masse entière, mais de chacune des molécules, en telle sorte qu'il est en même temps empêché, combattu, répercuté ; de là une continuelle alternative, une trépidation et des efforts incessants, et par la lutte une irritation d'où provient la fureur du feu qui sévit.

Cette *différence* se voit surtout dans la flamme et dans les liquides en ébullition, qui sont continuellement agités, se gonflent par petites parties et retombent alternativement.

Elle se voit dans les substances d'une contexture si ferme qu'elles ne s'enflent point quand on les chauffe ou qu'on les porte au rouge, et qu'elles n'éprouvent point de dilatation sensible : comme le fer rouge, dont la chaleur est très-intense. Autre preuve : lorsque l'air se dilate dans le tube thermométrique, sans aucun empêchement, d'un mouvement égal et tranquille, il ne produit point de chaleur sensible. Pareillement, lorsque les vents confinés font éruption subite avec violence, on n'éprouve pas de chaleur fort appréciable, parce qu'alors c'est un mouvement d'ensemble et non pas un mouvement alternatif de molécules.

. . . .

La *troisième différence,* dont nous parlons maintenant, est commune à la chaleur et au froid ; le mouvement contractif du froid est combattu par une réaction expansive, comme le mouvement expansif de la chaleur est combattu par une réaction contractive. Que la première impulsion ait lieu de la circonférence au centre ou du centre à la circonférence, la loi est la même.

. . . .

De cette *première vendange,* il résulte que la forme ou la définition vraie de la chaleur (considérée en elle-même, et non pas relativement à nos sensations) peut être exprimée ainsi, en peu de mots : *La chaleur est un mouvement expansif, combattu, et qui opère dans les molécules du corps.* Au caractère de l'expansion, il faut ajouter que c'est : *un mouvement du centre à la circonférence joint à un mouvement de bas en haut.* A cet autre caractère du mouvement, *action moléculaire,* il faut ajouter que l'action se fait *sans lenteur, avec une certaine rapidité, et même de l'impétuosité.* (Traduction de M. Lorquet.)

EXTRAIT DE L'ESSAI DU COMTE RUMFORD, INTITULÉ : « RECHERCHES SUR LA SOURCE DE LA CHALEUR ENGENDRÉE PAR LE FROTTEMENT »

(Lu devant la Société royale, le 25 janvier 1798.)

Préposé à la direction du forage des canons, dans les ateliers de l'arsenal militaire à Munich, et vivement frappé du degré très-élevé de température qu'un canon de cuivre acquiert en peu de temps, lorsqu'il est percé, et de la chaleur encore plus intense (bien supérieure à celle de l'eau bouillante) des copeaux métalliques détachés par l'alésoire, M. le comte Rumford se posa les questions suivantes :

« D'où vient la chaleur actuellement produite dans l'opération mécanique du forage?

« Est-ce la chaleur latente des copeaux métalliques séparés du métal qui sera redevenue libre?

« S'il en était ainsi, la capacité pour la chaleur des portions de métal réduites en copeaux ne devrait pas seulement être changée ; le changement subi par elles devrait être suffisamment grand pour rendre compte de *toute* la chaleur produite. Et cependant ce changement n'a pas lieu, car la capacité calorifique des copeaux est restée exactement la même que celle des tranches du même métal séparées par une scie fine, avec les précautions nécessaires pour éviter tout échauffement. »

Il suit de là évidemment que la chaleur produite n'a pu avoir été fournie aux dépens de la chaleur latente des copeaux. Rumford décrit longuement ces expériences, et elles sont concluantes.

Il consacra alors un cylindre spécial à des expériences ayant pour but la génération de la chaleur par le frottement. Une tarière émoussée ou arrondie pressait avec force contre le fond solide du cylindre, pendant que celui-ci tournait autour de son axe entraîné par des chevaux. Pour mesurer la chaleur développée, on avait ménagé dans le cylindre un trou destiné à recevoir un petit thermomètre à mercure. Le poids du cylindre était de 50 kilogrammes, 512.

La tarière était un morceau d'acier trempé de 16 millimètres d'épaisseur, 11 centimètres de longueur, et 9 centimètres de hauteur, comme le trou du cylindre ; la surface par laquelle son extrémité était en contact avec le fond du trou était d'environ 15 centimètres carrés. Au commencement de l'expérience, la température de l'air à l'ombre, et aussi celle du cylindre était de 15 de-

grés. Au bout de 30 minutes, et après que le cylindre eut fait 960 révolutions autour de son axe, la température a été trouvée de 55 degrés.

Ayant ôté la tarière, on retira alors la poussière métallique, ou plutôt les sortes d'écailles qui avaient été détachées du fond du cylindre, et l'on trouva que leur poids était de 54 grammes. « Est-il possible, s'écrie-t-il, que la quantité de chaleur très-considérable produite dans cette expérience, quantité qui élève réellement de 21 degrés la température de plus de 54 kilogrammes de bronze, puisse avoir été fournie par une quantité si minime de limaille, et cela par un simple *changement* de capacité pour la chaleur ?

« Mais, sans insister sur l'improbabilité de cette supposition, il suffira de rappeler qu'il résulte d'expériences positives et décisives, faites dans le but formel de constater si la capacité pour la chaleur du métal dont on fond les grands canons était *sensiblement changée* par sa réduction à l'état de copeaux métalliques, que cette capacité varie très-peu, si tant est qu'elle varie, alors même que le métal est réduit à de plus petits morceaux encore par une tarière moins tranchante. »

Rumford ensuite entoura son cylindre d'une caisse de sapin oblongue, de telle sorte qu'il pût y tourner sans donner issue au liquide intérieur, pendant que la tarière presserait contre son fond. Il versa dans la caisse assez d'eau pour couvrir entièrement le cylindre, et le fit tourner. La température de l'eau au début était de 15,4 degrés.

« Le résultat de cette belle expérience fut très-frappant, » écrit Rumford, « et le plaisir qu'elle me procura me dédommagea amplement de toutes les peines que je m'étais données pour inventer et combiner le mécanisme compliqué dont je me servais pour la faire. Le cylindre était en mouvement depuis un temps assez court lorsque je m'aperçus, en mettant ma main dans l'eau et touchant l'extérieur du cylindre, que de la chaleur était déjà engendrée.

« Au bout d'une heure, la température de l'eau, qui pesait 11,36 kilogrammes, s'était élevée de 24,6 degrés, puisqu'elle marquait 40 degrés.

« Trente minutes plus tard, ou une heure et demie après que la machine eut été mise en mouvement, la température de l'eau était de 61 degrés.

« Après deux heures vingt minutes, l'eau était à 92,4 degrés; enfin, après deux heures trente minutes, elle bouillait réellement. »

Rumford avait en vue cette expérience lorsqu'il faisait, sur la sur-

prise des assistants, la remarque que j'ai citée dans la première leçon.

Il estima ensuite soigneusement la quantité de chaleur que possédait chaque partie de son appareil à la fin de l'expérience, et, ajoutant le tout ensemble, il trouva une somme suffisante pour faire passer 12,06 kilogrammes d'eau de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante, ou d'élever de 100 degrés la température de cette eau. Il trouva, par un calcul bien fait, que cette chaleur était égale à celle qui serait donnée par la combustion de 150 grammes de cire.

Il détermina enfin la vitesse avec laquelle la chaleur était engendrée, et conclut ainsi : « Le résultat de ces calculs est que la quantité de chaleur produite uniformément, ou de manière à fournir, si je puis m'exprimer ainsi, un courant continu par le frottement d'une tarière d'acier émoussée contre le fond d'un cylindre creux de métal, *est plus grande* que celle qui serait produite par neuf *bougies de cire* de 2 centimètres de diamètre chacune, et brûlant toutes ensemble.

« Un seul cheval aurait pu faire le travail nécessaire à la rotation du cylindre, quoique j'en eusse appliqué deux. De la chaleur peut donc être ainsi engendrée par la force d'un seul cheval, et, en cas de nécessité, cette chaleur pourrait servir à la cuisson des aliments. Mais je ne puis pas imaginer de circonstances dans lesquelles cette manière de reproduire de la chaleur puisse être avantageuse; car la simple combustion du fourrage nécessaire à la nourriture du cheval donnerait plus de chaleur que son travail n'en ferait naître. »

Ce passage est extrêmement significatif, car il donne à entendre que, dans l'opinion très-nette de Rumford, la force des animaux dérive de la nourriture, et qu'il n'y a aucune création de force au sein des moteurs vivants.

« En méditant sur les résultats de toutes ces expériences, nous sommes amenés à cette grande question qui a été si souvent l'objet des spéculations des philosophes, à savoir : Qu'est-ce que la chaleur? Y a-t-il là quelque chose comme un fluide igné? Y a-t-il quelque chose qui puisse être appelé proprement calorique?

« Nous avons vu qu'une quantité très-considérable de chaleur pouvait être engendrée par le frottement de deux surfaces métalliques, et engendrée de manière à fournir un courant ou flux *dans toutes les directions*, sans interruption ou intermittence, et sans aucun signe de *diminution* ou d'*épuisement*. En raisonnant sur ce sujet, nous ne devons pas oublier *cette circonstance des plus remarquables*, que la source de la chaleur engendrée par le frottement dans ces expériences

paraît évidemment être *inépuisable*. (Les italiques sont de Rumford). Il est à peine nécessaire d'ajouter qu'une chose qu'un corps *isolé* ou un système de corps peuvent continuer de fournir *indéfiniment*, sans limites, ne peut absolument pas être une *substance matérielle*; et il me paraît extrêmement difficile, sinon tout à fait impossible, de se former une idée d'une chose capable d'être excitée ou communiquée dans ces expériences, à moins que cette chose ne soit du MOUVEMENT.

Lorsque l'on écrit l'histoire de la théorie mécanique de la chaleur, l'homme qui, en opposition à la croyance scientifique de son temps, a pu expérimenter et raisonner sur une expérience, comme Rumford l'a fait dans les recherches rappelées ici, ne peut pas être passé légèrement sous silence. C'est à peine si quelque chose de plus fort contre la matérialité de la chaleur a été produit depuis; c'est à peine si l'on peut imaginer quelque chose de plus concluant en vue d'établir que la chaleur est ce que Rumford la croyait être, du *mouvement*.

SUR LA COMPRESSION DE L'AIR CONTENANT DU BISULFURE DE CARBONE

« Un phénomène très-singulier a été observé à plusieurs reprises durant les expériences faites avec le bisulfure de carbone. Après qu'on eut déterminé l'absorption de la vapeur, le tube qui la contenait fut vidé aussi parfaitement que possible, et c'est à peine s'il contenait encore quelque trace de vapeur. De l'air sec fut cependant introduit pour achever de le nettoyer. On essaya de nouveau de faire le vide; on avait donné quelques coups de piston, lorsque la cloche tomba. Aussitôt une sorte d'explosion se fit entendre, et l'on vit une épaisse fumée bleue sortir du corps de pompe. La détonation s'arrêta dans la machine et ne s'étendit jamais en arrière du tube de l'expérience.

« C'est seulement avec le bisulfure de carbone que cet effet a été observé. Il peut, je pense, être expliqué de la manière suivante : Pour soulever la soupape du piston, le gaz qui est au fond du cylindre doit avoir une certaine tension, et la compression nécessaire à produire cette tension paraît suffisante pour provoquer la combinaison des principes constituants du bisulfure de carbone avec l'oxygène de l'air. Cette combinaison a certainement eu lieu, car l'acide sulfureux manifestait sa présence au sein de la fumée par son odeur caractéristique.

« Pour vérifier cette idée, j'ai essayé l'effet de la compression dans un briquet à air. Un peu de coton imbibé de bisulfure de car-

bone placé au fond du tube émettait un éclair brillant lorsque l'air était comprimé. En soufflant dans le verre avec un tube pour en chasser la fumée, on peut répéter vingt fois cette expérience avec le même morceau de coton.

« Il n'est même pas nécessaire de laisser le coton mouillé dans le tube du briquet; si, après avoir introduit le coton, on l'en retire vivement, l'éclair lumineux n'en apparaît pas moins quand on comprime l'air. De l'oxygène pur produit un éclair plus brillant que l'air atmosphérique. Ces faits sont d'accord avec l'explication qui précède.[1] »

[1] *Phil. Trans.*, 1861. *Phil. Mag.*, sept. 1861.

LEÇON III

(6 FÉVRIER, 1862)

Dilatation. — Formes solide, liquide et gazeuse de la matière. — Hypothèses relatives à la constitution des gaz. — Coefficient de dilatation. — Chaleur communiquée à un gaz sous pression constante. — Calcul de l'équivalent mécanique de la chaleur, par Mayer. — Dilatation des gaz sans refroidissement. — Zéro absolu de température. — Expansion des liquides et des solides : anomalie dans la manière dont se comportent l'eau et le bismuth. — Énergie de la force de cristallisation. — Effet thermal des fils étirés. — Anomalie dans la gomme élastique.

APPENDICE. — Données additionnelles relatives à la dilatation. — Extraits du premier mémoire scientifique de sir H. Davy : fusion de la glace par le frottement, etc.

Votre réapparition ici aujourd'hui, après la rude épreuve à laquelle j'ai soumis votre attention, m'encourage à espérer que la campagne que nous faisons ensemble ne sera pas entièrement sans succès. Je n'ai pas besoin de dire à un auditoire comme celui-ci que rien de grand dans le domaine de l'intelligence n'a pu être accompli ou assimilé sans effort. Newton attribuait la différence entre lui et les autres hommes à sa patience à considérer assidûment une question, jusqu'à ce que la lumière commençât à se faire sur elle ; et si nous avons la force d'imiter son exemple, nous recueillerons, sans aucun doute, une récompense proportionnée.

Dans la première leçon, j'ai fait tomber un lourd marteau sur une masse de plomb, et nous avons trouvé que le plomb était devenu chaud, aussitôt que le mouvement mécanique du marteau avait été éteint. Autrefois, on admettait que la force du marteau était simplement détruite par le choc. Dans les corps

élastiques on supposait qu'une portion de la force était rendue par l'élasticité du corps, qui forçait la masse tombée à rebondir; mais, dans le choc des corps non élastiques ou mous, c'était une chose accordée que la force d'impulsion était simplement perdue. Dans l'état actuel de nos connaissances, cette concession est une méprise capitale; nous n'admettons plus, en effet, qu'il y ait perte absolue; nous disons que lorsque le mouvement du marteau abattu cesse, il y a non annihilation, mais transformation ou mieux transmission de mouvement. Le mouvement d'ensemble et de masse est remplacé par le mouvement individuel des molécules ou atomes de la masse qui constitue ce que nous appelons chaleur. Quoique intense, ce mouvement est si minuscule, le déplacement des particules qui se meuvent est si petit, qu'il est invisible. Pour discerner ce qui se passe, force est de recourir à des yeux plus perçants et d'une portée plus grande, aux yeux et à la portée de l'esprit. Ainsi donc, dans le cas des corps solides, alors que la force de cohésion enchaîne encore les particules les unes aux autres, vous devez concevoir que ces particules sont animées d'un mouvement vibratoire compris entre certaines limites. Vous devez vous les figurer comme oscillant autour de leur position de repos. Vous devez admettre que plus est grande la quantité de chaleur que nous communiquons au corps, ou que plus est grande la quantité d'action mécanique dont nous l'investissons par la percussion, la pression ou le frottement, plus le mouvement moléculaire sera intense, plus sera grande l'amplitude des oscillations des particules. Cela posé, quoi de plus naturel que ces particules animées d'un mouvement de vibration, comme si elles cherchaient à occuper plus d'espace, tendent sans cesse à s'écarter les unes les autres, et à faire prendre un volume plus grand au corps, dont elles sont les parties constituantes? Telle est, en général, la conséquence de la chaleur communiquée aux corps, l'expansion ou dilatation du volume. Nous considérerons de près tout à l'heure le petit nombre d'exceptions apparentes à cette loi. Les particules des solides sont donc retenues ensemble par la force de cohésion; elles sont éloignées les unes des autres par la chaleur : voilà les deux principes antagonistes dont dépend

l'état d'agrégation moléculaire du corps. Concevons que la communication de la chaleur se continue; chaque accroissement de chaleur pousse les particules plus loin les unes des autres; mais la force de cohésion, comme toutes les forces connues, agit toujours plus faiblement, à mesure que croît la distance entre les particules qui sont le siége de cette cohésion. Quand donc la chaleur se renforce, son opposant s'affaiblit; jusqu'à ce que, finalement, les particules soient si complétement délivrées du rigide esclavage de la cohésion, qu'elles deviennent libres non-seulement de vibrer de part et d'autre d'une position fixe, mais aussi de rouler les unes autour des autres, de glisser les unes sur les autres. La cohésion n'est pas encore détruite, mais elle est tellement modifiée, qu'en même temps que les particules offrent encore de la résistance à leur séparation absolue, leur mobilité tangentielle à la surface les unes des autres ne rencontre aucun obstacle. Ce second état est l'état liquide de la matière.

Dans l'intérieur d'une masse liquide, le mouvement de chaque atome est empêché par les atomes qui l'environnent. Mais supposez que vous développiez au sein de cette masse liquide une chaleur suffisamment intense; qu'arrivera-t-il? Il arrivera que les particules briseront les dernières entraves de la cohésion, s'isoleront et s'échapperont pour former des bulles de vapeur. Si l'une des surfaces du liquide est tout à fait libre, c'est-à-dire non maintenue par un liquide ou par un solide, il est très-facile de concevoir que quelques-unes des particules superficielles qui vibrent à la surface sortiront tout à fait du liquide, et s'élanceront dans l'espace avec une certaine vitesse. *Ainsi délivrée de l'influence de cohésion*, la matière nous apparaît sous forme de *vapeur* ou de *gaz*.

Mon objet ici est de familiariser vos esprits avec la conception générale du mouvement atomique. J'ai parlé des vibrations des particules d'un solide comme déterminant son expansion. Quelques physiciens admettent que ces particules tournent les unes autour des autres, et que la chaleur, en augmentant leur force centrifuge, les entraîne à une plus grande distance les unes des autres. J'ai ici un poids attaché à un ressort en spirale : si je fais

tourner le poids au-dessus de ma tête, il tend à fuir loin de moi le ressort se redresse sur une certaine étendue ; et quand j'augmente la vitesse de rotation, le ressort, se redressant encore plus, accroît la distance du poids à ma main. On a pensé que l'accroissement de distance entre les atomes d'un corps produit par la chaleur serait dû également à la rotation de ses particules. Imaginez maintenant que le mouvement du poids s'accélère assez pour que le ressort se brise ; ce poids qui lui est attaché s'échapperait par la tangente à la courbe qu'il décrivait ; il représenterait un atome délivré, par la chaleur, de la force de cohésion grossièrement représentée par le ressort. Les idées des physiciens les mieux informés sont encore incertaines, quant à la nature intime du mouvement qui constitue la chaleur, mais le grand point, à présent, est de la considérer comme un mouvement d'une certaine espèce, et de laisser aux recherches futures à lui assigner un caractère plus précis.

Nous pourrions étendre aux gaz la notion des atomes tournant les uns autour des autres, et expliquer les phénomènes qu'ils présentent par un mouvement de ce genre. Mais j'énonçais tout à l'heure, relativement aux particules gazeuses, une idée qui est à présent très-habilement soutenue[1], l'idée que ces particules s'élancent sans cesse en droite ligne à travers l'espace. Chacun doit avoir remarqué combien rapidement le parfum d'un corps odorant remplit une chambre, et ce fait est en harmonie parfaite avec l'idée de la projection en ligne droite des particules. Mais on prouve que si la théorie du mouvement rectiligne est vraie, les particules doivent se mouvoir avec une vitesse de quelques centaines de mètres par seconde. Et il en résulterait que les odeurs, par exemple, devraient se répandre plus vite que l'observation ne l'indique.

La réponse à cette objection est que les particules odorantes ont à cheminer à travers une multitude de particules d'air, qu'elles choquent à chaque pas. La distance que la particule

[1] Par MM. Joule, Kronig, Maxwell ; et, dans une série de mémoires extrêmement remarquables, par M. Clausius.

odorante parcourt dans l'air en ligne droite, et sans avoir à venir se briser contre une particule d'air, est infiniment petite, relativement au chemin total parcouru ; et par suite, la propagation d'un parfum dans l'air est énormément retardée par l'air lui-même. On sait que quand une libre communication est ouverte entre la surface d'un liquide et un certain espace, cet espace, lorsqu'il est vide, est rempli à saturation par la vapeur du liquide, bien plus rapidement que lorsqu'il renferme de l'air.

Dans cette hypothèse, nous avons donc à nous figurer un corps gazeux comme un corps dont les particules s'élancent en ligne droite à travers l'espace, se heurtant les unes contre les autres comme de petits projectiles, et rebondissant contre les parois de l'espace qu'elles occupent. Mon préparateur, après avoir placé cette vessie à demi pleine d'air sous le récipient de la machine pneumatique, fait jouer les pistons et soutire l'air qui environne la vessie. Celle-ci se gonfle ; l'air intérieur paraît la remplir entièrement, au point de faire disparaître tous ses plis et toutes ses rides. Comment cette expansion de la vessie s'est-elle produite ? Dans la théorie que nous venons d'énoncer, elle résulte de ce que les projectiles atomiques lancés contre sa surface intérieure ont repoussé l'enveloppe de dedans en dehors jusqu'à ce que sa tension pût résister à leur effort. Si l'on fait rentrer l'air dans le récipient, la vessie se ride et revient à sa première forme parce que la charge des particules d'air contre la surface extérieure de la vessie repousse l'enveloppe de dehors en dedans, et force en même temps les particules intérieures à unir leur feu, jusqu'à ce qu'enfin la force du dedans, redevenant égale à celle du dehors, l'enveloppe revienne au repos. De même toutes les impressions qui naissent en nous de l'air chaud ou de la vapeur sont dues, dans cette hypothèse, aux impulsions des atomes gazeux. Ils excitent dans les nerfs les mouvements qui leur sont propres ; les nerfs transmettent ces mouvements au cerveau, et le cerveau déclare que c'est de la chaleur. Par exemple, la sensation que l'on reçoit en entrant dans la chambre chaude d'un bain turc est produite par la canonnade atomique que l'atmosphère de cette chambre est si apte à entretenir.

Si, au lieu de placer la vessie sous le récipient de la machine pneumatique et d'aspirer l'air dans lequel elle est plongée, j'accrois, par l'application de la chaleur, la force de projection des particules intérieures; ces particules, quoique relativement peu nombreuses, frappent avec une impétuosité si grande contre la surface intérieure, qu'elles forcent l'enveloppe à céder; la vessie se gonfle et devient en apparence pleine d'air. Je la tiens près du feu, et vous voyez que toutes ses rides ont disparu. Mais vous me direz peut-être qu'il ne devrait pas en être ainsi, parce que l'air situé en dehors de la vessie est lui-même près du feu, que sa force de projection croît, par conséquent, dans la même proportion, et qu'en pressant l'enveloppe de dehors en dedans, il doit empêcher son expansion. Il est vrai que la vessie et l'air en contact avec elle sont également près du feu ; mais dans une leçon suivante vous apprendrez que l'air extérieur à la vessie se laisse traverser par les rayons de chaleur sans grande augmentation de température, tandis que la vessie absorbe cette même chaleur rayonnante; son *enveloppe* s'échauffe d'abord et communique ensuite sa chaleur, par contact, à l'air intérieur ; de plus, l'air extérieur qui s'échauffe, lui aussi, au contact de la vessie, pouvant se dilater librement dans l'espace environnant, épuise ainsi l'excès d'énergie qu'il avait conquis, et ne peut pas résister par conséquent à l'expansion de l'air confiné contenu dans la vessie. L'expérience que nous venons de faire n'est donc qu'une simple manifestation de la force expansive de la chaleur. L'appareil que je vous présente est destiné à mettre le même fait en évidence d'une autre manière. F (fig. 20) est un flacon ne contenant que de l'air, et que je veux chauffer avec cette petite lampe à l'esprit-de-vin placée au-dessous. Un tube recourbé va du flacon à une capsule contenant un liquide coloré. Dans la capsule plonge, renversé, un tube de verre *tt* de 60 centimètres, son sommet fermé en haut, son orifice ouvert en bas. Vous savez que la pression atmosphérique suffit à maintenir suspendue dans le tube une colonne liquide ; le mien, en effet, est rempli d'eau jusqu'à son sommet, et le tube plus petit, venu du flacon, vient déboucher au-dessous de son orifice. Toute bulle d'air qui sor-

tira du flacon devra monter dans le gros tube. Je chauffe maintenant le flacon ; l'air qu'il contient se dilate, par la raison déjà

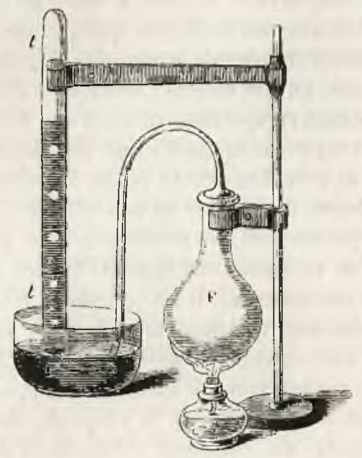


Fig. 20.

donnée ; des bulles d'air sortent par l'extrémité du tube recourbé et montent au sommet du tube *tt*. L'air accumulé à ce sommet fait baisser rapidement la colonne liquide, jusqu'à ce que, après un petit nombre de secondes, toute la colonne de liquide ait été remplacée par l'air.

Il est parfaitement manifeste que l'air, ainsi dilaté par la chaleur, est plus léger que l'air non dilaté, et que notre flacon, à la fin de l'expérience, est plus léger qu'il ne l'était au commencement de tout le poids de l'air qu'il a cédé au tube vertical. En supposant donc qu'un sac en tissu léger fût rempli de cet air très-dilaté, il serait, par rapport à l'air extérieur plus dense et plus lourd, ce qu'une goutte d'huile est par rapport à l'eau dans laquelle on l'a versée. Et de même que l'huile, plus légère, monte à la surface de l'eau, de même le sac, rempli d'air chaud ou dilaté, monterait dans l'atmosphère ; tel est le principe des ballons que l'on désigne du nom de *ballons à feu*.

Mon préparateur va enflammer un peu d'étoupe dans ce vase;

au-dessus il placera cet entonnoir, et sur l'entonnoir je maintiendrai ouvert l'orifice de ce ballon de papier. L'air échauffé par l'étoupe enflammée entre dans le ballon, qui se gonfle ; sa tendance à s'élever est déjà manifeste ; je le laisse aller, et il va frapper le plafond de la salle.

Mais il ne nous suffit pas de considérer ces phénomènes d'une manière générale ; si nous ne procédions pas à des déterminations quantitatives exactes, nos découvertes ne seraient pour nous que confusion et embarras. Nous commencerons par chercher le total de la dilatation qu'une quantité donnée de chaleur peut produire dans un gaz. C'est un point important et qui demande notre attention toute spéciale. Lorsque nous parlons du volume d'un gaz, nous ne pouvons pas avoir une idée distincte de sa valeur réelle, si nous faisons abstraction de la température, puisque le volume varie considérablement avec la température. Prenez un volume de gaz à la température de l'eau qui commence à se congeler, ou de la glace qui commence à fondre, c'est-à-dire à la température de 32° Fahr., ou 0° Cent., et élevez d'un degré la température de ce gaz, en maintenant constante *la pression sur chaque pouce carré de l'enveloppe qui contient le gaz*. Son volume augmentera d'une quantité que nous désignerons par a. Augmentons la température d'un second degré, le volume augmentera de $2\ a$; un troisième degré de température accroîtra le volume de $3\ a$ et ainsi de suite : c'est-à-dire que pour chaque degré dont nous élevons la température du gaz, son volume augmente de la même quantité a. Quelle est cette quantité ? Quel qu'ait pu être le volume du gaz à la température de la glace fondante, quand sa température s'élèvera d'un degré Fahrenheit, son volume croîtra d'un $\frac{1}{499}$; il croîtra d'un $\frac{1}{273}$ si la température s'élève d'un degré centigrade. Un mètre cube de gaz, par exemple, à 0° C., échauffé d'un 1°, devient 1 $\frac{1}{273}$ mètres cubes : exprimé en décimales.

1 vol à 0°	devient	à 1° C.	$1 + 0{,}00367$
—	—	à 2° C.	$1 + 0{,}00367 \times 2$
—	—	à 3° C.	$1 + 0{,}00367 \times 3$, et ainsi de suite

Le nombre constant 0,00367, qui exprime la fraction de son volume dont un gaz, à la température de la glace fondante, se dilate quand sa température s'élève d'un degré, s'appelle le *coefficient de dilatation* du gaz. Bien entendu que si on fait usage des degrés Fahrenheit le coefficient de dilatation diminuera dans la proportion de 9 à 5.

Ceci bien éclairci, nous aborderons lentement un sujet intéressant, mais difficile. Concevons que nous ayons une quantité d'air contenue dans un cylindre très-allongé A B (fig, 21), dont la section transversale ait pour aire un centimètre carré. Le cylindre est ouvert par en haut; un piston P, dont le poids, pour des raisons que nous dirons tout à l'heure, est de 1 700 grammes, monte et descend dans le cylindre, sans frottement, comme aussi sans donner jamais passage à l'air situé au-dessous. Au commencement de l'expérience, le piston est au point P, dont la distance au fond du cylindre est de 273 centimètres; et l'air au-dessous du piston est à 0°. Cela posé, si la température de l'air s'élève de 0° à 1°, le piston s'élèvera de 1 centimètre, et se trouvera à 274 centimètres du fond. Il sera à 275 centimètres si la température s'élève de 2°; à 276 si elle s'élève de 3°; à 283 si elle s'élève de 10°; à 373 si elle s'élève de 100°, etc.; enfin, si la température s'élève de 273°, la colonne d'air se sera accrue de 273 centimètres; en d'autres termes si l'on chauffe l'air jusqu'à 273°, son volume sera doublé.

A

P

0°C.

B

Fig. 21.

Il est évident que dans cette expérience l'air fait un travail. En se dilatant, à partir de P et s'élevant, il a à vaincre la pression exercée de haut en bas par l'atmosphère, pression égale à un kilogramme ou mieux à 1 030 grammes par centimètre carré, et aussi le poids du piston, qui est de 1 700 grammes. Il en résulte, la section du cylindre étant 1 centimètre carré, qu'en se dilatant de P en P', le gaz fait un travail représenté par l'élévation d'un poids de 2 730 grammes à une hauteur de 273 centimètres. C'est juste le travail qui serait accompli si le vide, étant

fait au-dessus de P on plaçait en P un piston pesant 2 730 grammes.

Faisons varier, maintenant, notre mode d'expérimentation; et, au lieu de laisser se dilater le gaz dont on élève la température, opposons-nous à sa dilatation, en augmentant la pression qu'il supporte. En d'autres termes, maintenons-le pendant qu'on le chauffe à un *volume constant.* Supposons, comme auparavant, que la température initiale du gaz soit 0°, et que la pression qu'il supporte, en y comprenant le poids du piston, soit, comme d'abord, de 2 730 grammes. Si nous chauffons le gaz de 0° à 1°, quel poids devrons-nous ajouter pour que son volume reste le même ou demeure constant? Exactement 10 grammes. Mais nous avons admis que le gaz était soumis, au début, à une pression de 2 730 grammes, et que la pression qu'il supporte est la mesure de sa force élastique; donc, si on l'échauffe de 1°, sa force élastique sera augmentée de 1/273e de celle qu'il possédait à 0°. Il faudra augmenter la pression de 20 grammes si on le chauffe de 2°; de 30 grammes si on le chauffe de 3°; et si enfin on élève sa température à 273°, il faudra ajouter 2 730 grammes pour maintenir son volume constant.

C'est simplement pour plus de clarté, et pour écarter les fractions de notre discussion, que nous avons fait la pression initiale du gaz égale à 2 730 grammes. Quelle que soit en réalité cette pression initiale, une élévation de température de 1° augmentera de 1/273e la force élastique que le gaz possède à 0°; et, si l'on élève sa température de 273°, en même temps que son volume reste constant, sa force élastique sera doublée. Comparons maintenant cette seconde expérience à la première. Là, nous avons d'abord fait passer de 0° à 273° la température d'une certaine quantité de gaz; et ce gaz a acquis un volume double quand il a élevé à 273 centimètres de hauteur un poids de 2 730 grammes. Ici, nous chauffons la même quantité de gaz de 0° à 273°, mais nous ne lui laissons supporter aucun poids. Nous maintenons son volume constant. La quantité de matière chauffée dans les deux cas est la même; la température à laquelle elle est portée est la même, mais les quantités absolues de chaleur communiquées

dans les deux cas sont-elles les mêmes? En aucune manière. Si, pour élever de 273° la température du gaz dont le volume est maintenu constant, il faut 10 grammes de combustible, il en faudra 14 grammes $\frac{1}{4}$ pour élever du même nombre de degrés la température du gaz dont la pression seule reste constante. La chaleur produite par la combustion du poids additionnel de 4 $\frac{1}{4}$ grammes, dans le second cas, est consumée et dépensée tout entière à élever le poids. En nombre exact, la quantité de chaleur appliquée, lorsque le volume reste constant, est à la quantité de chaleur appliquée, quand la pression est constante, dans le rapport de

1 à 1,421

Ce fait, extrêmement important, a servi de base au premier calcul de l'équivalent mécanique de la chaleur. Nous touchons ici à un point qui demande toute votre attention, et qui la mérite. Je vais essayer de refaire devant vous ce calcul mémorable.

C (fig. 21 *a*) est un vase cylindrique dont la base a un mètre carré de surface; PP est le niveau supérieur d'un mètre cube d'air à la température de 0 degré; la hauteur AP est par conséquent d'un mètre. Échauffons l'air jusqu'à ce que son volume soit doublé; pour qu'il en soit ainsi, il faudra, comme nous l'avons expliqué plus haut, élever la température de 273°; et lorsqu'il sera ainsi dilaté, son niveau sera en P'P', à un mètre au-dessus de la position initiale. Mais, en s'élevant de PP en P'P', il a refoulé l'atmosphère qui exerce à sa surface supérieure une pression de 10 336 kilogrammes par mètre carré; c'est-à-dire, en d'autres termes, qu'il a élevé à la hauteur d'un mètre un poids de 10 336 kilogrammes.

Fig. 21 *a*.

La *capacité calorifique* de l'air ainsi dilaté est 0,24, celle de l'eau étant prise pour unité; et le poids de notre cube d'air est 1 293 grammes; donc, la quantité de chaleur requise pour élever 1 293 grammes d'air à 273° élèverait à cette même température un poids d'eau quelque peu inférieur au quart de ce poids d'air.

Le poids exact d'eau équivalent à nos 1 293 grammes d'air est

$$1\,293 \times 0{,}24 = 310 \text{ grammes.}$$

Mais 310 grammes d'eau chauffée à 273° équivalent à 273×0,310 ou 84,6 kilogrammes d'eau chauffée à 1°. La chaleur communiquée à notre mètre cube d'air, pour doubler son volume, et qui l'a rendu capable d'élever à 1 mètre de hauteur un poids de 10 336 kilogrammes, suffirait donc à élever d'un degré la température de 84,6 kilogrammes d'eau.

Ici l'air était chauffé *sous pression constante*, et nous avons appris que la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un certain nombre de degrés la température d'un gaz sous pression constante, est à la quantité de chaleur nécessaire pour élever à la même température cette même quantité de gaz maintenue sous volume constant, dans le rapport de

1,42 à 1 ou de 84,6 à 60;

donc la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 273° la température de notre mètre cube sous volume constant, est aussi la quantité de chaleur qui élèverait de 1° la température de 60 kilogrammes d'eau.

Retranchant 60 de 84,6, nous trouvons que l'excédant de chaleur communiqué à l'air, dans le cas où on le laisse libre de se dilater, suffit à élever d'un degré la température de 24,6 kilogrammes d'eau.

Ainsi que nous l'avons expliqué, cet excédant de chaleur est employé à élever à la hauteur d'un mètre un poids de 10 336 kilogrammes. Divisant 10 336 par 24,6, nous trouvons en nombres ronds 420; c'est-à-dire que la quantité de chaleur qui élèverait de 1° la température d'un kilogramme d'eau suffit à élever à la hauteur d'un mètre un poids d'environ 420 kilogrammes.

Cette manière de calculer l'équivalent mécanique de la chaleur a été proposée par M. le docteur Mayer, médecin à Heilbronn, dans le Wurtemberg, au printemps de 1842.

Le premier mémoire de M. Mayer contient simplement l'indication de la marche à suivre pour trouver l'équivalent; mais le calcul n'est pas fait. C'est évidemment une sorte de note préliminaire, écrite pour prendre date. La convertibilité et l'indestructibilité de la force y sont énoncées, et l'auteur fait appel à l'équivalent mécanique de la chaleur, pour mieux faire saisir ces deux principes. Si ce premier mémoire était resté seul, les services rendus par Mayer à la théorie mécanique de la chaleur auraient été bien moindres qu'ils ne le sont réellement; mais, en 1845, il publia un *Essai* sur le mouvement organique, qui, à part quelques passages isolés, est une œuvre d'un mérite extraordinaire. Ce premier essai fut suivi, en 1848, d'un second sur la *Dynamique céleste*, dans lequel M. Mayer développait la théorie de l'alimentation météorique du soleil avec une hardiesse, une sagacité et une plénitude remarquables. Somme toute, M. Mayer a des droits incontestables à prendre place, comme homme d'un vrai génie, au premier rang des fondateurs de la théorie mécanique de la chaleur.

Le 21 août 1843, M. Joule fit une communication à l'Association britannique, alors réunie à Cork, et dans la troisième partie de son mémoire[1] il décrivit une série d'expériences sur l'électro-magnétisme, exécutée en vue de déterminer *la valeur mécanique de la chaleur*. Il donne comme résultat de ses laborieuses investigations les poids qui, élevés à un pied de hauteur, sont les équivalents de la chaleur nécessaire pour élever de 1° Fahrenheit la température d'une livre d'eau.

1°	896 lbs.	5°	1036 lbs.
2°	1001 —	6°	587 —
3°	1040 —	7°	742 —
4°	910 —	8°	860 —

En 1844, M. Joule déduisit d'expériences sur la compression de l'air les équivalents suivants de la chaleur qui élèverait de 1° Fahrenheit la température d'une livre d'eau :

[1] *Phil. Mag.*, 1843, vol. XXIII, p. 435.

823 pieds-livres.
795 —
820 —
814 —
760 —

A mesure que l'habileté de l'expérimentateur croît, nous voyons les écarts devenir de plus en plus petits. En 1845, M. Joule déduisit d'expériences sur de l'eau agitée par une roue à palettes, cette nouvelle valeur

890 pieds-livres.

Faisant alors la somme de tous les résultats et prenant la moyenne, il trouva que l'équivalent était de

817 pieds-livres.

En 1847, il trouva, comme moyenne de deux expériences,

781,8 pieds-livres.

Enfin, en 1849, en opérant avec toutes les précautions que sept années d'expérience lui avaient fait juger nécessaires, il obtint les nombres suivants :

772,692,	du frottement	de l'eau.	moyenne de	40	expériences.
774,083,	—	du mercure,	—	50	—
774,987,	—	de la fonte de fer,	—	20	—

Des raisons énumérées dans son mémoire ont fait adopter à M. Joule, pour valeur exacte de l'équivalent :

772 pieds-livres, ou 423,5 kilogrammètres.

La méthode suivie par Mayer, en 1842, donnerait

771,4 pieds-livres, ou 423,2 kilogrammètres.

Une pareille coïncidence écarte de l'esprit toute ombre d'incertitude relativement à l'exactitude du chiffre définitivement adopté pour l'équivalent mécanique de la chaleur.

Ai-je rappelé ces faits dans le but d'exalter M. Mayer aux dépens de M. Joule? C'était bien loin de mon intention. Le mérite de

l'homme, M. Joule, qui, pendant de longues années, sans encouragement, et en face de difficultés que l'on aurait justement crues insurmontables, a marché d'un pas ferme et sans que rien pût l'arrêter, à la conquête d'un triomphe aussi éclatant, ne saurait être déprécié.

En outre de ses expériences, l'esprit de synthèse qui brille en elles, et les applications qu'il a su en faire, assurent à M Joule une place d'honneur au premier rang des philosophes physiciens. Les travaux de M. Mayer portent, dans une certaine mesure, le cachet d'une profonde intuition qui arrive cependant quelquefois à la hauteur d'une conviction inébranlable. Les travaux de M. Joule, au contraire, sont des démonstrations expérimentales. Fidèle aux tendances spéculatives de l'Allemagne, M. Mayer, de prémisses chétives fait surgir de larges et puissantes conclusions. Tandis que, plus positif, le physicien anglais cherche, avant tout, à établir solidement les faits. Et il a réussi ! L'historien futur de la science ne fera pas naître, je l'espère du moins, d'antagonisme entre ces deux hommes. A tous deux leur réputation est faite, et elle ne s'affaiblira pas de longtemps, tant est grande la gloire qu'ils ont conquise, non-seulement en établissant la théorie mécanique de la chaleur, mais en ouvrant la voie à une plus juste appréciation des énergies générales de l'univers.

Arrêtons maintenant nos conclusions relativement à l'influence que l'accomplissement d'un travail exerce sur la quantité de chaleur communiquée à un gaz. N'est-il pas possible de permettre à un gaz de se dilater sans faire aucun travail? Cette question trouve sa réponse dans cette expérience très-importante qui fut faite d'abord par Gay-Lussac. Voici deux vases de cuivre, A, B (fig. 22) de même volume ; l'un, A, est vide, et l'autre, B, est rempli d'air. Je tourne le robinet C; l'air s'élance de B dans A, jusqu'à ce qu'il soit à la même pression dans les deux vases. L'air du vase, B, en faisant sortir ses propres molécules fait un travail, et les expériences que nous avons déjà faites nous apprennent que le résultat de ce travail sera le refroidissement de la portion d'air restée dans B. Les particules d'air entrées dans A avaient une certaine vitesse engendrée aux dépens de la chaleur

perdue par le vase B. Mais cette vitesse a été presque aussitôt éteinte par le choc contre les parois du vase A, avec restitution et réapparition de la chaleur perdue par l'air du vase B. Mêlez ensemble les contenus de A et de B, et vous aurez de l'air à sa température initiale. Il n'y a pas eu de travail accompli, il n'y aura donc pas de chaleur perdue. M. Joule a fait cette expérience en comprimant à 22 atmosphères l'air de l'un des vases, tandis que l'autre restait vide, et il a constaté, en entourant les deux vases d'eau convenablement agitée, qu'il n'y avait aucune élévation de température quand on permettait au gaz de s'élancer d'un vase dans l'autre[1]. De la même manière, admettons que le sommet du cylindre (fig. 20) est fermé, que le vide est parfait dans la moitié au-dessus du piston, que l'air de la moitié inférieure est chauffé à 273°, et que son volume est maintenu constant. Si l'on supprime la pression, l'air se dilatera et remplira le cylindre; la portion inférieure de la colonne sera par là même refroidie, mais la portion supérieure sera échauffée, et si l'on mêle les deux portions ensemble, toute la colonne d'air sera à la température de 273°. Dans ce cas nous élevons la température du gaz de 0° à 273°, et nous lui permettons ensuite de doubler son volume; l'état du gaz, au commencement et à la fin, est le même que lorsqu'il se dilate sous pression constante, ou qu'il soulève un poids constant; mais la quantité absolue de chaleur dans le dernier cas est plus grande, dans le rapport de 1,421 à 1, la différence était due à ce fait, que, dans un cas, le gaz fait un travail mécanique qu'il ne fait pas dans l'autre cas.

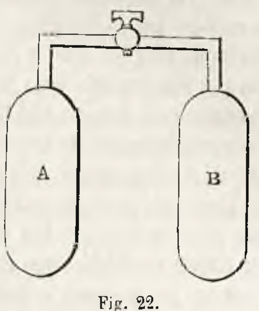


Fig. 22.

Cette expérience nous apprend que la simple raréfaction est insuffisante par elle-même à déterminer l'abaissement de la température moyenne d'une masse d'air. C'était, et c'est encore une

[1] *Phil. Mag.*, 1845, vol. XXVI, p. 578.

doctrine reçue, que la simple expansion d'un gaz détermine un refroidissement, de quelque manière que cette expansion soit produite. On explique le froid des régions les plus hautes de l'atmosphère par la dilatation de l'air. On pense que la capacité calorifique est plus grande dans le cas du gaz raréfié que dans celui du gaz non raréfié. Mais le refroidissement qui accompagne la dilatation est due, en réalité, à la consommation de chaleur dans l'accomplissement du travail par le gaz qui se dilate. Là où aucun travail n'est accompli, il n'y a pas de refroidissement produit.

Tout ceci, pour devenir clair, exige de la réflexion ; mais chaque effort de ce genre fait par votre esprit rendra moins pénibles les efforts semblables que vous aurez à faire plus tard; et dussiez-vous ne pas parvenir actuellement à la plénitude de la compréhension, je ne cesserai pas de vous recommander la patience. Ne quittez pas cette portion de notre sujet sans vous être efforcés de la saisir; luttez avec elle pendant quelque temps et ne vous désespérez pas, alors même que l'évidence fuirait devant vous.

J'ai maintenant à appeler votre attention sur une autre question intéressante. Nous avons vu que la force élastique de notre gaz croissait avec la température.

Dans une enveloppe inflexible, chaque degré de chaleur produit un accroissement défini de force élastique dû à l'énergie accrue des projectiles gazeux. Partant de zéro et nous élevant de plus en plus, nous voyons que chaque degré nouveau de chaleur produit une augmentation de force élastique, égale au 273 millième de celle que le gaz possédait à 0°; et, par conséquent, en élevant sa température de 273°, nous doublons sa force élastique. En supposant que la même loi se vérifie au-dessous de 0, et que chaque degré de chaleur soustrait du gaz fasse diminuer sa force élastique, ou le mouvement qui la produit, d'un 273 millième de celle qu'il possédait à 0°, il est manifeste qu'à la température de 273° centigrades au-dessous de 0°, nous n'aurions plus aucune force élastique. Le mouvement auquel la force élastique est due devra s'évanouir à cette limite, et nous atteindrons ce qu'on appelle le *zéro absolu de température*.

Sans doute que, dans la réalité physique, chaque gaz s'écartera

de la loi de contraction que nous venons d'énoncer avant de tomber si bas, et qu'il deviendra solide avant d'atteindre — 273°, ou le zéro absolu. Celui-ci, d'ailleurs, est considérablement au-dessous de tous les froids qu'il nous a été donné d'obtenir.

Je ne veux pas vous imposer aujourd'hui de plus longs efforts relativement à ce sujet; je passe maintenant à la mise en évidence, au moyen de l'expérience, de la dilatation des liquides par la chaleur.

Voici un ballon rempli d'alcool et fortement bouché par un bouchon que traverse (fig. 25) le tube *t′ t* ouvert par en haut; le

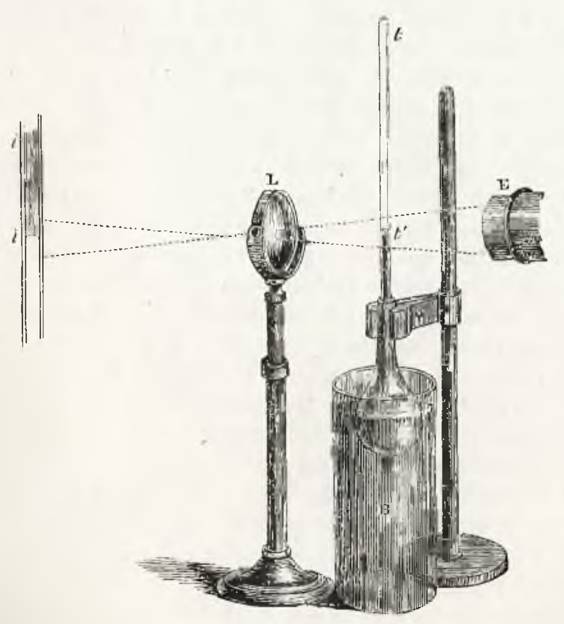


Fig. 25.

liquide s'élève d'un décimètre environ dans le tube. Je vais chauffer le ballon; l'alcool se dilatera et s'élèvera dans le tube. Mais je désire que vous le voyiez monter, et, pour vous le faire voir, je place le tube *tt′* en avant de l'objectif E, d'où sort la lu-

mière d'une lampe électrique; un faisceau de lumière éclaire le tube en t' à l'endroit où finit la colonne liquide. En avant du tube, je place une lentille convergente L, à une distance telle, qu'elle projette sur un écran l'image agrandie, mais très-nette, de la colonne liquide. Vous voyez maintenant, sans peine le point où elle se termine; vous voyez le frissonnement de la couche limite, et si elle vient à se mouvoir, vous la suivrez dans tous ses déplacements. Maintenant, je remplis le vase D d'eau chaude et je le soulève assez pour que l'eau chaude entoure le ballon. Je n'ai pas besoin de vous faire remarquer que l'image sur l'écran est renversée et que quand le liquide se dilatera, le sommet de la colonne *descendra* sur l'écran, au lieu de monter. Suivez l'expérience dès son début: le ballon plonge dans l'eau chaude, et le sommet de notre colonne *monte*, comme si le liquide se contractait. Maintenant il s'arrête, et commence à descendre; il continuera ainsi d'une manière permanente. Pourquoi commence-t-il par monter? Cette marche irrégulière n'est pas due à la contraction du liquide, mais à la *dilatation momentanée du verre du ballon*, qui reçoit le premier l'impression de la chaleur. Il se dilate avant que la chaleur puisse agir efficacement sur le liquide, et, par suite, la colonne descend; mais bientôt la dilatation du liquide surpasse celle du verre, et la colonne monte. Deux choses sont ici démontrées; la dilatation du verre solide par la chaleur, et le fait que la dilatation observée du liquide ne nous donne pas sa véritable augmentation de volume, mais seulement la différence de dilatation entre le verre et lui.

J'ai ici un autre ballon plein d'eau, d'une capacité exactement égale à celle du premier, et muni d'un tube semblable. Je le mets dans la même position, et je répète avec lui l'expérience faite avec l'alcool. Vous voyez, tout d'abord, l'effet transitoire de la dilatation du verre, et ensuite la dilatation permanente du liquide; mais vous pouvez remarquer que cette dernière procède bien plus lentement que dans le cas de l'alcool; l'alcool se dilate plus rapidement que l'eau. Si nous soumettions cent liquides à cette même épreuve, il se pourrait que nous les vissions tous se dilater par la chaleur; et nous pourrions être ainsi amenés à

conclure que la dilatation par la chaleur est une loi sans exception; mais cette conclusion serait erronée. Et c'est, en réalité, pour mettre en évidence une exception de ce genre, que j'ai eu recours à ce ballon d'eau. Je vais le refroidir en le plongeant dans un milieu un peu plus froid que l'eau au moment de sa congélation. Ce milieu est un mélange de glace pilée et de sel marin. Vous voyez la colonne s'abaisser graduellement, parce que l'eau cède sa chaleur au mélange réfrigérant et se contracte. Cette contraction devient de plus en plus lente, et la voici tout à fait arrêtée. Un léger mouvement commence dans le sens opposé, et maintenant le liquide *se dilate visiblement*. J'agite le mélange réfrigérant de manière à amener les parties les plus froides en contact avec le ballon; plus le mélange est froid, plus la dilatation est rapide. Nous prenons ici la nature sur le fait d'un arrêt dans sa marche ordinaire, d'un renversement de ses habitudes. La réalité est que l'eau va se contractant jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de 39° Fahrenheit, ou 4° centigrades, et qu'à ce point seulement la contraction cesse. C'est ce qu'on appelle le point du maximum de densité de l'eau; à partir de là, jusqu'au point de congélation, l'eau se dilate; et lorsqu'elle se convertit en glace, sa dilatation est grande et soudaine. La glace, nous le savons, flotte sur l'eau, parce qu'elle est devenue plus légère par cette dilatation. Si maintenant nous chauffons au lieu de refroidir, la série des changements observés se reproduit en sens inverse : la colonne descend, moutrant *la contraction du liquide* par la chaleur. Après quelque temps, la contraction cesse, et la dilatation permanente commence.

La force avec laquelle ces changements moléculaires s'effectuent est tout à fait irrésistible. Ils surviennent ordinairement dans des conditions qui ne nous permettent pas d'observer l'énergie développée dans l'acte de leur production. Mais, pour vous donner un exemple de cette énergie, j'ai enfermé de l'eau dans une bouteille de fer. Le fer est épais de plus d'un centimètre et demi, et la quantité d'eau est relativement petite, quoique suffisante pour remplir la bouteille. La bouteille est fermée par un bouchon fortement vissé sur son goulot. Voici une seconde bou-

teille toute semblable et préparée de la même manière. Je les place toutes deux dans ce vase de cuivre et je les entoure d'un mélange réfrigérant. Elles se refroidissent graduellement ; l'eau qu'elles contiennent approche de son maximum de densité ; sans doute qu'en ce moment l'eau ne remplit pas tout à fait les bouteilles, un petit vide existe à l'intérieur. Mais bientôt la contraction cesse, et la dilatation commence ; l'espace vide se remplit lentement, l'eau passe graduellement de l'état liquide à l'état solide ; dans ce passage, elle a besoin d'un espace plus grand que le fer rigide lui refuse. Mais la rigidité du fer est impuissante à lutter contre les forces atomiques. Ces atomes sont des géants travestis. Vous entendez ce bruit : la première bouteille est brisée par les molécules cristallisées; la seconde a subi le même sort, et voici les fragments des deux vases, témoins irrécusables de leur épaisseur, témoins très-frappants aussi de l'énergie incroyable qui les a fait naître[1].

Il ne vous est pas difficile maintenant de comprendre l'effet des gelées d'hiver sur les conduites d'eau de vos maisons. J'ai sous la main de nombreux morceaux de ces tuyaux, tous crevés. Vous ne vous apercevez du dommage que quand le dégel commence, mais le mal s'est fait réellement au temps de la gelée ; les tuyaux ont alors crevé, et l'eau s'échappe par les fentes, quand la glace solide de l'intérieur est liquéfiée.

Il est à peine nécessaire que je m'arrête à l'importance de cette propriété de l'eau dans l'économie de la nature. Supposons un lac exposé à un ciel pur d'hiver : l'eau de la surface se refroidit et se contracte ; elle devient ainsi plus lourde ; elle tombe par l'excès de son poids, et sa place est prise par l'eau plus légère de dessous. Au bout de quelque temps, cette nouvelle eau est refroidie et tombe à son tour. Il s'établit ainsi une circulation continue ; l'eau froide, plus dense, descendant, et l'eau plus légère et plus chaude montant à la surface. En supposant que cet échange

[1] Des cylindres de métal, épais d'un centimètre et demi, sont incapables de résister à la force décomposante d'une petite batterie galvanique. M. Gassiot a fait éclater plusieurs cylindres de ce genre par le gaz né de la décomposition de l'eau.

se continue, même après que les premières pellicules de glace se sont formées à la surface, la glace s'enfoncera à mesure de sa formation[1], et ce mouvement ne s'arrêtera qu'alors que l'eau entière du lac se sera solidifiée.

La mort de tous les êtres vivants du lac serait la conséquence nécessaire de cette solidification absolue; mais, au moment où le danger devient menaçant, la nature s'arrête dans sa marche ordinaire, elle force l'eau à se dilater par le refroidissement, et cette eau froide flotte comme une écume à la surface de l'eau plus chaude située au-dessous. La solidification survient, mais la glace, beaucoup plus légère que l'eau sous-jacente, forme un abri protecteur pour les êtres vivants qu'elle recouvre.

De tels faits excitent naturellement et justement notre émotion; en réalité, les rapports de la vie avec les conditions essentielles de son existence, cette adaptation générale dans la nature des moyens à la fin, excitent au plus haut degré l'intérêt du philosophe. Mais quand il s'agit des phénomènes naturels, il faut bien surveiller ses sentiments. Ils nous conduiraient souvent, sans que nous nous en doutassions, à dépasser les limites du fait. Par exemple, j'ai souvent entendu invoquer cette propriété de l'eau comme une preuve irréfragable et unique en son genre de dessein dans la nature et de pure bienveillance? Pourquoi, disait-on, l'eau jouirait-elle seule d'une propriété aussi merveilleuse, si ce n'était pas pour défendre la nature contre elle-même. Le fait est, cependant, que l'eau n'est pas seule dans le cas. Vous voyez cette bouteille de fer, crevée du goulot jusqu'au fond; je la brise avec ce marteau, et elle vous apparaît remplie à l'intérieur par un noyau métallique. Ce métal est du bismuth; je l'ai versé dans la bouteille lorsqu'il était fondu, et j'ai bouché la bouteille avec une vis, exactement

[1] M. le professeur William Thomson a soulevé récemment une question qui mérite d'être prise en sérieuse considération par les géologues théoriciens. S'il est vrai que les principes constituants de l'écorce terrestre se *contractent* en se solidifiant, comme les expériences faites jusqu'ici semblent l'indiquer, la rupture et la chute de la croûte auraient certainement suivi sa formation. Dans ces circonstances, il est extrêmement difficile de concevoir comment une écorce solide peut s'être formée, ainsi qu'on l'admet généralement, autour d'un noyau liquide.

comme dans le cas de l'eau. Le métal s'est refroidi, il s'est solidifié, il s'est dilaté, et la force d'expansion a suffi pour faire éclater la bouteille. Il n'y avait pas ici de poissons à sauver, et cependant le bismuth fondu s'est comporté exactement comme l'eau. Qu'il me soit permis de le dire une fois pour toutes, le physicien, en tant que physicien, n'a rien à faire avec le but ou le dessein, avec les causes finales : c'est-à-dire que sa mission est de rechercher ce qu'est la nature, non pourquoi elle est ; ce qui n'empêche pas que, comme les autres et plus que les autres, il doive se sentir transporté d'admiration en présence des mystères qui l'environnent de toutes parts et dont ses études ne sauraient lui donner le dernier mot.

Nous passons maintenant à la dilatation des corps solides par la chaleur, et, voici de quelle manière je veux la rendre sensible à vos yeux. J'ai ici deux supports en bois, A et B (fig. 24), auxquels

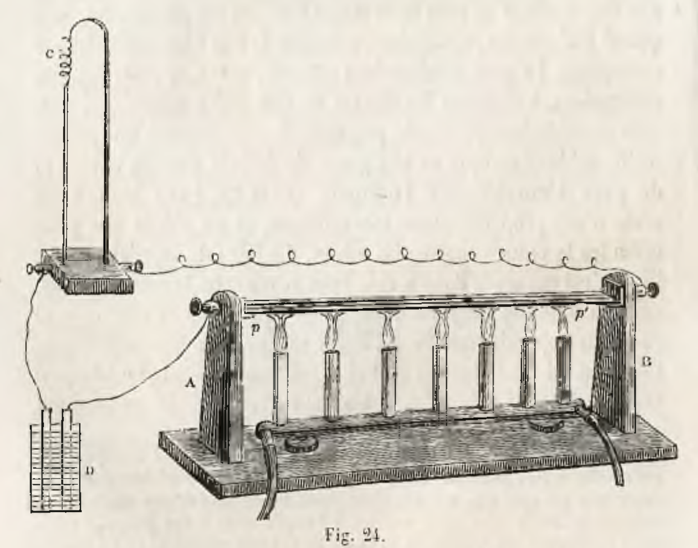


Fig. 24.

sont fixées deux plaques de cuivre p, p'. Voici deux barres d'égale longueur, l'une de cuivre, l'autre de fer, et vous remarquerez

qu'elles ne sont pas assez longues pour atteindre d'un support à l'autre. Elles touchent la plaque de laiton par une de leurs extrémités seulement, et reposent par l'autre extrémité sur un petit prolongement en bois. J'unis par des fils de laiton l'une des plaques p avec un des pôles d'un élément voltaïque D, l'autre p' avec le petit instrument placé sur le bord de la table; un second fil de laiton relie cet instrument à l'autre pôle de l'élément.

Cet instrument n'est guère qu'un support destiné à porter une spirale C, en fil de platine, qui devra s'illuminer d'une lumière blanche très-pure quand elle sera traversée par le courant de l'élément D. A présent, la seule cause de la rupture du circuit est le défaut de longueur des barres de fer et de laiton, qui ne leur permet pas de toucher à la fois les deux plaques de laiton p, p'. J'allume les jets de gaz placés sous les barres métalliques; elles s'échauffent; elles se dilatent; dans quelques instants, elles iront d'une plaque à l'autre. Lorsque cela arrivera, le courant passera, et la soudaine incandescence de la spirale de platine indiquera que la lacune est comblée. Elle ne s'illumine pas encore, le pont n'est pas établi; elle brille maintenant, indiquant qu'une des barres, ou toutes les deux, se sont assez dilatées pour aller d'une plaque à l'autre. Laquelle est-ce? Je retire le fer, le platine reste incandescent; je replace le fer et je retire le laiton, la lumière s'éteint. C'est le laiton qui a franchi le détroit. C'est une démonstration évidente non-seulement du fait général de la dilatation, mais aussi du fait que les différents corps se dilatent à des degrés différents.

Les dilatations du cuivre et du fer sont très-petites; et divers instruments ont été imaginés pour les mesurer. Ces instruments portent le nom général de pyromètres. Mais j'ai ici le moyen de multiplier bien plus qu'avec le pyromètre ordinaire l'effet de dilatation qu'il s'agit de constater. Voici une barre de fer solide et verticale. Elle porte à son sommet un miroir sur lequel je projette le faisceau lumineux de la lampe électrique; le rayon se réfléchit et va illuminer la partie supérieure de la muraille; tout est arrangé de telle sorte que si la barre se raccourcit, le miroir tourne dans un sens; que si elle s'allonge, le miroir tourne en

sens opposé. Chaque mouvement du miroir, quoique très-petit, est comme centuplé par le long bras de levier du rayon lumineux, lequel a en outre cet avantage que sa vitesse angulaire est double de celle du miroir. La seule insufflation de mon haleine chaude contre cette barre massive de fer produit un déplacement visible du reflet lumineux; et si je la chauffe un moment avec la flamme d'une lampe à l'esprit-de-vin, la projection lumineuse va descendre le long du mur, et parcourir un espace de plus de 10 mètres. Je retire la lampe, et je laisse la barre se refroidir; elle se contracte, et la projection lumineuse remonte le mur; je hâte le refroidissement et la contraction en versant un peu d'alcool sur la barre de fer; la lumière remonte plus vite; la voilà revenue près du plafond, comme au commencement de l'expérience [1].

J'ai établi que les différents corps se dilatent différemment [2]; que le laiton, par exemple, se dilate plus, par la chaleur, que le fer. Voici deux règles, l'une de fer, l'autre de laiton; elles sont soudées ensemble de manière à former, à cette température, une règle composée droite. Mais si la température vient à changer, la règle perdra sa forme rectiligne. Je la chauffe, elle se courbe dans un sens; je la refroidis, elle se courbe en sens contraire. Lorsqu'elle est échauffée, le laiton, qui se dilate davantage, forme le côté convexe de la règle devenue courbe. Lorsqu'elle est refroidie, le laiton, qui se contracte davantage, forme la concavité de la courbe. Des faits de ce genre doivent naturellement être mis en ligne de compte dans les constructions qu'il faut défendre de toute torsion. La force avec laquelle les corps se dilatent lorsqu'ils sont chauffés ne peut être dominée par aucun des efforts mécaniques dont nous disposons. Toutes les forces moléculaires, quoique le champ de leur action soit si minime, ont une énergie en quelque sorte infinie. La force de contraction née du refroi-

[1] L'appareil avec lequel cette expérience a été faite a une destination toute différente. C'est pourquoi j'en indique simplement le principe.

[2] Le coefficient de dilatation de quelques substances bien connues est donné dans l'appendice qui suit cette leçon.

dissement a été souvent employée par les architectes pour ramener à la position verticale des murs qui penchaient. Si un corps est cassant, l'échauffement d'une de ses parties peut, par la dilatation qu'il produit, exercer sur d'autres parties des pressions ou tensions assez fortes pour déterminer leur rupture. De l'eau chaude versée dans un verre le fait souvent éclater par la dilatation soudaine de l'intérieur. La contraction produite par un froid intense peut aussi le faire éclater.

J'ai ici quelques flacons de verre très-épais, qui, après avoir été soufflés, ont été refroidis subitement. L'extérieur s'est refroidi et solidifié le premier. L'intérieur s'est refroidi plus lentement ; et, en se refroidissant, il s'est trouvé comme emprisonné au sein d'une cloison solide, sur laquelle il a exercé son puissant effet de contraction. Il en résulte que les parties superficielles de ces flacons sont dans un tel état de tension, que la plus légère éraillure suffit à les briser. Je projette dans celui-ci un grain de sable ; et le simple choc de ce petit morceau de quartz dur fait voler son fond en éclat. Voici encore ce que l'on appelle en Angleterre gouttes de Rupert, en France, larmes bataviques, formées de gouttes de verre fondu soudainement refroidies dans l'eau. L'écorce solide extérieure a à lutter contre la tension née de la dilatation intérieure. Cette tension s'exerce si également sur toute la surface, qu'aucune partie ne cède. Mais si je brise simplement ce filament de verre qui forme la queue de la goutte, toute sa masse sera réduite instantanément en poussière. Je plonge la goutte dans un petit flacon plein d'eau, et je brise sa queue restée en dehors ; elle est brisée avec une telle force, que le choc, transmis par l'eau, a suffi pour mettre le flacon en morceaux.

Un effet vraiment curieux de la dilatation a été observé et expliqué, il y a quelques années, par M. le chanoine Mosely. Le toit du chœur de la cathédrale de Bristol est en feuilles de plomb ; sa longueur est de 20 mètres et sa hauteur de 7 mètres. Il avait été posé en 1851, et deux ans après, c'est-à-dire en 1853, il était descendu de près de 1 mètre 50 centimètres. Le plomb avait commencé à descendre presque immédiatement après

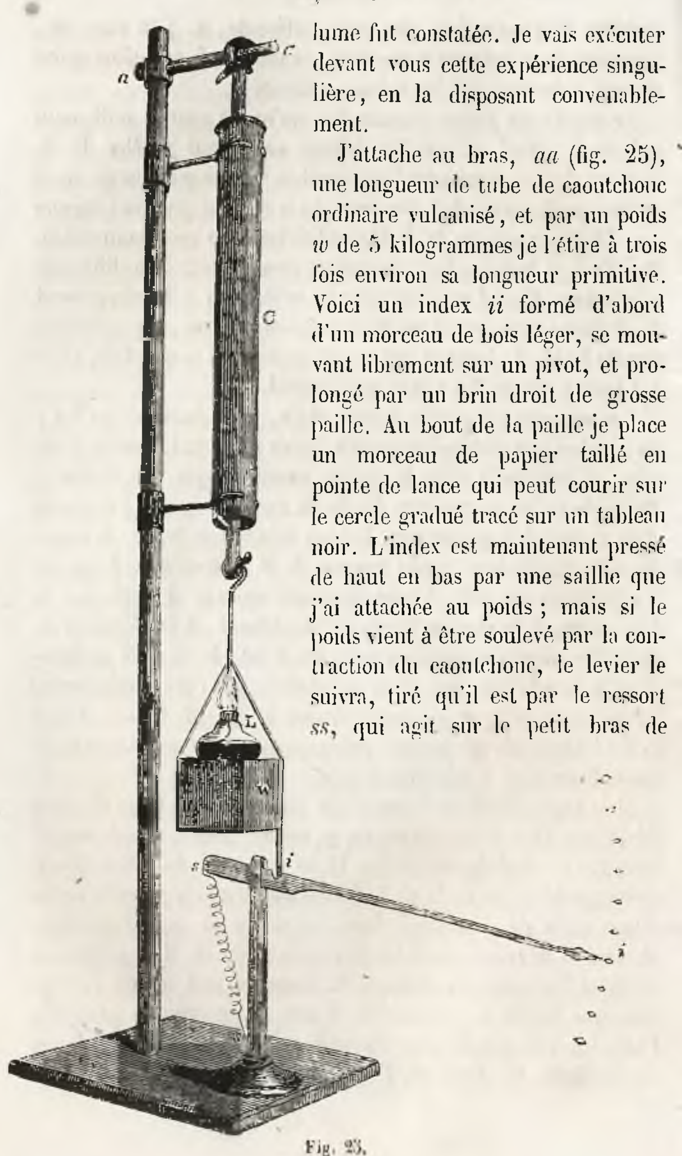
la pose. On avait essayé, mais en vain, de l'arrêter dans sa marche par des clous plantés dans les chevrons; la force qui l'entraîne est telle que les clous sont violemment arrachés. La pente du toit n'est pas très-roide ; les plombs seraient toujours restés en place, leur poids ne les aurait pas fait glisser. Quelle est donc la cause qui les a fait descendre? La voici tout simplement. Le plomb est exposé aux variations de température du jour et de la nuit. Durant le jour, la chaleur le fait dilater. S'il avait reposé sur une surface horizontale, il se serait dilaté également dans tous les sens, mais comme il était placé sur une surface inclinée, il se dilatait plus en descendant qu'en montant. Quand, au contraire, il se contractait pendant la nuit, le retrait de haut en bas du bord supérieur était plus grand que le retrait de bas en haut du bord inférieur. Ses mouvements sont donc exactement ceux d'un ver de terre. Il pousse en avant son bord inférieur pendant le jour ; il tire à lui son bord supérieur pendant la nuit: c'est ainsi qu'en rampant lentement il s'est avancé de 1 mètre 50 centimètres en deux ans. Les variations de température du jour ou de la nuit agissaient dans le même sens; M. le chanoine Mosely aurait même constaté que la plus grande part du résultat total revenait à ces changements plus brusques de température. Non-seulement les différents corps se dilatent différemment par la chaleur, mais un même corps peut se dilater différemment dans les différents sens. Les atomes, au sein des cristaux, sont juxtaposés suivant certaines lois; ils sont plus serrés sur quelques lignes. Probablement aussi que, dans les substances cristallines, les atomes oscillent plus librement et plus amplement dans certaines directions que dans d'autres. La conséquence de ces dispositions doit être une dilatation inégale par la chaleur dans les différentes directions. M. le professeur Mitscherlich a prouvé que ce cristal que je tiens à la main (le spath d'Islande) se dilate plus le long de son axe cristallographique que dans toute autre direction. Il y a plus : tandis que le cristal se dilate dans son ensemble, c'est-à-dire tandis que son volume est réellement augmenté par la chaleur, il y a contraction actuelle dans une direction perpendiculaire à l'axe de cristallisation. Plusieurs autres cristaux se dilatent aussi d'une

manière différente dans des sens différents; et j'en suis sûr, beaucoup de structures organiques, examinées à ce même point de vue, présenteraient les mêmes inégalités.

La nature est pleine d'anomalies qu'on ne saurait nullement prévoir *a priori*, et que l'expérience seule peut révéler. De la manière dont se comportent un nombre immense de corps, nous aurions pu être amenés à conclure que la chaleur produit toujours une dilatation, et que le froid produit toujours une contraction. Mais l'eau et le bismuth protestent et nous forcent à modifier nos conclusions. Quand on comprime un métal, il y a développement de chaleur; mais quand on étire un fil métallique, il y a production de froid. M. Joule et autres ont approfondi la question, et ils ont trouvé que ce fait n'était pas général.

Une exception frappante à cette règle, je ne doute pas qu'il n'y en ait plusieurs autres, est connue depuis un grand nombre d'années, et je tiens à vous la rendre manifeste par l'expérience. Mon aide va me donner une feuille de caoutchouc que j'ai placée dans la chambre voisine pour la tenir tout à fait froide. Je coupe de cette feuille une bande longue de 8 centimètres, large de 4 ; je place ma pile thermo-électrique sur son dos, et, sur la face en avant, je place la bande de caoutchouc. A la déviation de l'aiguille, vous reconnaissez qu'il est froid. Je prends maintenant la bande par ses deux extrémités, je l'étire subitement en même temps que je l'appuie contre la face de la pile. Voyez l'effet! L'aiguille se déplace énergiquement, et montre que le caoutchouc étiré a échauffé la pile.

Mais toute déviation à une règle entraîne à sa suite d'autres déviations. Dans le monde physique, comme dans le monde moral, les actes ne sont jamais isolés. Il en est ainsi de notre caoutchouc; sa déviation de la règle énoncée n'est que le premier terme d'une série de déviations. Dans plusieurs de ses recherches, M. Joule a eu pour associé un physicien éminent, M. le professeur William Thomson: or, lorsque M. Thomson eut appris l'exception que faisait le caoutchouc à une règle presque générale, l'idée lui vint que le caoutchouc devait diminuer de volume en s'échauffant. M. Joule fit l'expérience, et la diminution de vo-



lume fut constatée. Je vais exécuter devant vous cette expérience singulière, en la disposant convenablement.

J'attache au bras, *aa* (fig. 25), une longueur de tube de caoutchouc ordinaire vulcanisé, et par un poids *w* de 5 kilogrammes je l'étire à trois fois environ sa longueur primitive. Voici un index *ii* formé d'abord d'un morceau de bois léger, se mouvant librement sur un pivot, et prolongé par un brin droit de grosse paille. Au bout de la paille je place un morceau de papier taillé en pointe de lance qui peut courir sur le cercle gradué tracé sur un tableau noir. L'index est maintenant pressé de haut en bas par une saillie que j'ai attachée au poids ; mais si le poids vient à être soulevé par la contraction du caoutchouc, le levier le suivra, tiré qu'il est par le ressort *ss*, qui agit sur le petit bras de

Fig. 25.

l'index. Le tube de caoutchouc, vous le voyez, traverse une cheminée en tôle, par laquelle je vais maintenant faire monter un courant d'air chauffé par la lampe L. Vous voyez l'effet : l'index monte, montrant que le caoutchouc se contracte ; et en continuant d'appliquer la chaleur pendant une minute environ, je ferai décrire à l'extrémité de mon index un arc de plus d'un mètre. Je retire la lampe, et comme le caoutchouc revient à sa température première, il s'allonge ; l'index se meut de haut en bas, et ne s'arrête même qu'au-dessous de la position qu'il occupait d'abord.

APPENDICE A LA LEÇON III

REMARQUES ULTÉRIEURES SUR LA DILATATION

Il n'entre pas dans le plan de ce cours de descendre au détail de tous les phénomènes de la dilatation; mais, par égard pour mes jeunes lecteurs, je vais compléter cette leçon par quelques remarques additionnelles.

Le coefficient linéaire, superficiel ou cubique de la dilatation est cette fraction de la longueur, de la surface ou du volume dont un corps augmente lorsqu'il est chauffé d'un degré.

En supposant que l'un des côtés d'une plaque carrée de métal, dont la longueur est 1, se dilate de la quantité a lorsqu'elle est échauffée d'un degré, le côté du nouveau carré sera $1 + a$, et sa surface

$$(1 + a)^2 = 1 + 2a + a^2.$$

Dans le cas de la dilatation par la chaleur, la quantité a est si petite que son carré est presque insensible, par la raison que le carré d'une petite fraction est beaucoup plus petit que la fraction elle-même. On peut donc, sans erreur sensible, supprimer a^2 dans l'expression ci-dessus, et la surface du carré dilaté devient

$$1 + 2a.$$

$2a$ est donc le coefficient de dilatation superficielle que l'on obtient en multipliant par 2 le coefficient de dilatation linéaire.

Supposons qu'au lieu d'un carré, nous ayons un cube de côté 1, et qu'en élevant de 1° la température du cube, le côté, en se dilatant, devienne $1 + a$, le volume du cube dilaté serait alors

$$(1 + a)^3 = 1 + 3a + 3a^2 + a^3.$$

Ou, en négligeant, comme dans le premier cas, le carré a^2, et à plus forte raison le cube a^3 de a, à cause de leur extrême petitesse :

$$1 + 3a;$$

c'est-à dire que le coefficient de la dilatation cubique s'obtient en triplant le coefficient de la dilatation linéaire.

Le tableau suivant donne les coefficients de dilatation pour plusieurs substances bien connues :

Cuivre.	0,000017	0,000051	0,000051
Plomb.	0,000029	0,000087	0,000089
Étain.	0,000023	0,000069	0,000069
Fer.	0,0000123	0,000037	0,000037
Zinc.	0,0000294	0,000088	0,000089
Verre.	0,000008	0,000024	0,000024

Les chiffres de la seconde colonne sont les coefficients linéaires de dilatation pour 1° ; les chiffres de la troisième colonne sont les triples de ces mêmes coefficients ou les dilatations cubiques des substances; la quatrième colonne, enfin, donne les dilatations cubiques des mêmes substances déterminées *a posteriori*, par le professeur Kopp [1]. On voit que les coefficients de M. Kopp s'accordent presque exactement avec ceux qu'on obtient en triplant les coefficients linéaires.

Le coefficient linéaire du verre pour 1° est

0,0000080.

Celui du platine est

0,0000088.

Le verre et le platine se dilatent donc presque également. Ceci est de la plus grande importance pour les chimistes qui se trouvent dans la nécessité de fondre des fils de platine dans des tubes de verre. Si les coefficients étaient différents, la contraction qui a lieu dans le refroidissement ferait inévitablement casser le verre.

LE THERMOMÈTRE.

L'eau doit sa liquidité au mouvement de la chaleur. Lorsque ce mouvement s'affaiblit suffisamment, la cristallisation commence, comme nous l'avons vu. La température de la cristallisation est parfaitement constante quand l'eau est maintenue sous la même pression. Par exemple, l'eau cristallise dans tous les climats, au niveau de la

[1] *Phil. Mag.*, 1852, vol. III, p. 268.

mer, à une température de 32° Fahr., ou 0° C. La température de la condensation de la vapeur est également constante, aussi longtemps que la pression demeure la même. La fusion de la glace et la congélation de l'eau se donnent la main, si je puis ainsi parler, à 32° F. ou 0°C; la condensation de la vapeur et l'ébullition de l'eau se donnent la main à 210° F. ou à 100° C. : 32° F. et 0°C. sont donc le point de congélation de l'eau et le point de fusion de la glace ; 212° F. et 100° C. sont le point de condensation de la vapeur et le point d'ébullition de l'eau. Ces deux températures sont invariables aussi longtemps que la pression reste la même. Nous entrons ainsi en possession de deux températures étalons d'une valeur inappréciable ; aussi les a-t-on fait servir à cet usage dans le monde entier. Le thermomètre à mercure est un simple récipient surmonté d'une tige à canal capillaire. Le canal doit être d'égal diamètre sur toute sa longueur. Le récipient et une portion du tube sont remplis de mercure. On les plonge alors tous deux dans la glace fondante : le mercure se contracte, la colonne descend et arrive enfin au repos. Marquons le point auquel il devient stationnaire ; c'est le *point de congélation* du thermomètre. Retirons l'instrument, plongeons-le dans l'eau bouillante ; le mercure se dilate, la colonne s'élève et finit par redevenir stationnaire. Marquons encore ce point ; c'est le *point d'ébullition* du thermomètre. L'espace entre le point de congélation et le point d'ébullition a été divisé, par Réaumur, en 80, par Fahrenheit, en 180, et par Celsius, en 100 parties égales, appelées degrés. Le thermomètre de Celsius s'appelle aussi thermomètre centigrade.

Réaumur et Celsius désignent l'un et l'autre par 0° le point de congélation ; Fahrenheit le désigne par 32°, car il avait en vue un zéro qu'il s'imaginait à tort être le plus grand froid terrestre. Le point d'ébullition de Fahrenheit est donc 212°. Celui de Réaumur est 80°, tandis que celui de Celsius est de 100°.

Les longueurs des degrés de ces trois thermomètres étant entre elles dans le rapport de 80 : 100 : 180 : ou 4 : 5 : 9 ; rien de plus facile de les convertir les uns dans les autres. Si vous avez besoin de convertir Fahrenheit en Celsius, multipliez par 5 et divisez par 9 ; si Celsius en Fahrenheit, multipliez par 9 et divisez par 5. 20 degrés de Celsius sont égaux à 36 degrés Fahrenheit ; mais si nous voulons connaître à quel degré du thermomètre Fahrenheit correspond 20° de Celsius, nous devons ajouter 32 à 36 ; la température de 20° Celsius est donc égale à la température 68° marquée par Fahrenheit.

EXTRAITS DU PREMIER MÉMOIRE SCIENTIFIQUE DE SIR H. DAVY AYANT POUR TITRE « SUR LA CHALEUR, LA LUMIÈRE ET LES COMBINAISONS DE LA LUMIÈRE[1] »

Les modes particuliers d'existence des corps, solidité, fluidité, gazéité, dépendent, dans l'opinion des caloristes, de la quantité du fluide qui entre dans leur composition. Ce fluide, en s'insinuant entre leurs particules, en les séparant les unes des autres, et en s'opposant à leur contact immédiat, est, suivant eux, la cause de la répulsion.

D'autres physiciens, que les arguments produits en faveur de l'existence de ce fluide ne satisfont pas, et qui voient la génération de la chaleur par le frottement et la percussion, ont admis que la chaleur est un mouvement. Considérant que la découverte de la vraie cause du pouvoir répulsif serait d'une haute importance pour la philosophie naturelle, je me suis efforcé d'éclaircir avec soin cette partie de la science chimique par des expériences; et, de ces expériences, dont je vais donner les détails, je conclus que la chaleur ou la cause de la répulsion n'est pas une *matière*.

LES PHÉNOMÈNES DE RÉPULSION NE DÉPENDENT PAS, QUANT A LEUR EXISTENCE, D'UN FLUIDE ÉLASTIQUE PARTICULIER; EN D'AUTRES TERMES, LE CALORIQUE N'EXISTE PAS.

Sans considérer les effets du pouvoir répulsif dans les corps, ou sans chercher à prouver de ces effets qu'ils sont un mouvement, j'essayerai de démontrer, par des expériences, que la cause de ce pouvoir répulsif n'est pas une matière; et, pour y parvenir, je suivrai la méthode appelée par les mathématiciens : Réduction à l'absurde, *Reductio ad absurdum*.

Supposons d'abord que l'élévation de température produite par le frottement et la percussion provienne d'une diminution de la capacité calorifique des corps sur lesquels on agit. Dans ce cas, il sera certain que l'action exercée aura dû produire dans ces corps quelque changement qui diminue leur capacité et augmente leur température.

Expérience. — Je me suis procuré deux parallélipipèdes de glace[2]

[1] *Œuvres de sir Humphry Davy*, vol. II (*Works*).

[2] Le résultat de cette expérience est le même, si au lieu de glace on emploie de la cire, du suif, de la résine, ou quelque substance fusible à une température basse; le fer lui-même peut être fondu par le choc.

à 29° de température, de 6 pouces de longueur, 2 de largeur et 2 tiers de pouce d'épaisseur ; ils étaient attachés par des fils à deux barres de fer. Par un mécanisme particulier, leurs surfaces étaient amenées en contact, et on leur faisait exercer l'un contre l'autre, pendant quelques minutes, un frottement continu et violent. Ils ont été presque entièrement convertis en eau. Cette eau fut recueillie, et sa température fut reconnue être de 35°, après qu'elle fut restée dans une atmosphère plus basse pendant quelques minutes. La fusion avait eu lieu seulement dans le plan de contact des deux morceaux de glace, et aucun autre corps que la glace n'avait pris part au frottement.

Il résulte évidemment de cette expérience que la glace est convertie en eau par le frottement, et, dans l'hypothèse admise, sa capacité aurait dû diminuer : or, c'est un fait bien connu que la capacité de l'eau pour la chaleur est bien plus grande que celle de la glace, et qu'il faut fournir à la glace une quantité notable de chaleur avant qu'elle puisse être convertie en eau. Donc le frottement ne diminue pas la capacité des corps pour la chaleur. Il résulte aussi évidemment de cette expérience que l'élévation de température qui résulte du frottement ne peut pas provenir de la décomposition de l'oxygène au contact de la glace, car celle-ci n'a aucune affinité pour l'oxygène. Puisque l'élévation de température qui résulte du frottement ne peut provenir de la diminution de capacité, ni de l'oxydation des corps sur lesquels on agit, la seule supposition qui reste à faire est qu'elle provient d'une quantité de chaleur positivement ajoutée à ces corps, laquelle chaleur doit être soutirée des corps avec lesquels ils étaient en contact. Il faudrait alors que le frottement fit naître dans les corps quelque changement qui les rendît aptes à soutirer de la chaleur aux corps qui les environnent.

Expérience. — Je me suis procuré un mouvement d'horlogerie construit de telle sorte, qu'il pût être mis en action sous un récipient vide. Une des roues extérieures du mécanisme venait toucher une plaque mince de métal. De la chaleur sensible était produite en quantité considérable par le frottement entre la roue et la plaque lorsque le mécanisme était mis en activité sans être isolé des corps capables de lui céder de la chaleur. Immédiatement après, je me procurai un petit morceau de glace[1] : autour de son bord supérieur je

[1] La température de la glace et de l'atmosphère environnante était de 32° au commencement de l'expérience ; celle du mouvement d'horlogerie était également de 32°. A la fin de l'expérience, la température de

creusai une petite gorge que je remplis d'eau. Le mécanisme fut installé sur le morceau de glace, mais sans contact avec l'eau. Le tout ainsi disposé fut placé sous un récipient préalablement rempli d'acide carbonique, et j'introduisis en même temps, sous le récipient, une certaine quantité de potasse ou d'alcali caustique.

On commença à extraire alors l'air du récipient. L'action du piston, jointe à l'absorption exercée par la potasse, avait dû réaliser, il me semble, un vide parfait.

On fit partir alors le mouvement d'horlogerie ; la cire fondit rapidement, accusant ainsi une élévation de température.

Le frottement accumule donc du calorique, et ce calorique, dans l'hypothèse admise, a dû être emprunté aux corps en contact avec le mécanisme. Or, dans cette expérience, la glace est le seul corps en contact avec la machine ; et, si cette glace avait cédé du calorique, l'eau qu'elle porte aurait dû se solidifier. L'eau qu'elle portait n'a pas été congelée, donc la glace n'a pas cédé de calorique. Le calorique n'a pas pu venir davantage des corps en contact avec la glace, car il aurait dû traverser la glace pour pénétrer dans le mécanisme, et, s'il avait traversé la glace, celle-ci aurait été convertie en eau.

La chaleur produite par le frottement ne peut pas avoir été empruntée aux corps environnants, et il a été prouvé par la première expérience que l'élévation de température résultant du frottement ne peut provenir ni d'une diminution de capacité ni d'une oxydation. Et cependant, si on la considère comme une matière, elle devrait provenir de l'une ou l'autre de ces sources. Donc, puisqu'il est démontré par ces expériences qu'elle ne provient ni de l'une ni de l'autre, c'est qu'elle ne peut pas être considérée comme une matière. Il est donc démontré expérimentalement que le calorique ou la matière de la chaleur n'existe pas.

Les solides sont dilatés par un frottement violent et prolongé, et si leur température est plus élevée que celle de nos corps, ils affectent les organes de nos sens de cette sensation particulière connue sous le nom de chaleur.

la partie la plus froide du mécanisme était de près de 33° ; celle de la glace et de l'atmosphère environnante était la même qu'au commencement de l'expérience : de sorte que la chaleur produite par le frottement des différentes parties de la machine suffisait à élever d'un degré au moins la température de près d'une demi-livre de métal, et à liquéfier dix-huit grains de cire (la quantité employée).

Puisque les corps sont dilatés par le frottement, il est évident que leurs molécules doivent se mouvoir ou se séparer les unes des autres.

D'un autre côté, le frottement ou la percussion doivent nécessairement engendrer un mouvement vibratoire des molécules : donc nous pouvons raisonnablement admettre que ce mouvement ou cette vibration est la chaleur ou le pouvoir répulsif.

Cette chaleur ou ce pouvoir qui s'oppose au contact réel des molécules des corps, et qui est la cause des sensations particulières que nous appelons chaleur et froid, peut être définie un mouvement particulier, probablement vibratoire, des molécules des corps, tendant à les séparer. Ce mouvement peut être appelé proprement le mouvement répulsif.

Puisqu'il existe un mouvement répulsif, les particules des corps peuvent être considérées comme soumises à l'action de deux forces opposées; le pouvoir qui les rapproche et que nous pouvons désigner plus simplement du nom d'attraction, et le mouvement répulsif. La première de ces forces est la résultante de l'attraction de cohésion, par laquelle les particules tendent à venir au contact les unes des autres, de l'attraction de gravitation ou de pesanteur qui les entraîne vers les grandes masses de matière contiguës, et de la pression à laquelle elles sont soumises, pression dépendant de la gravitation ou du poids des corps superposés.

La seconde force est l'effet de ce mouvement particulier d'impulsion ou de vibration départi aux molécules, tendant à les éloigner les unes des autres, et pouvant être engendré, ou mieux, accru, par le frottement ou la percussion. Les effets de l'attraction de cohésion, la grande cause de rapprochement, sur les particules des corps, sont exactement semblables à ceux de l'attraction de gravitation sur les grandes masses de matière qui composent l'univers, et la force répulsive est analogue à la force de projection planétaire.

Dans sa *Philosophie chimique*, p. 94 et 95, Davy s'exprime ainsi : « Par un degré modéré de frottement, ainsi qu'il résulte des expériences de Rumford, la même pièce de métal peut être tenue chaude aussi longtemps qu'on veut, de sorte que, si on en faisait sortir de la chaleur, elle devrait en contenir une quantité inépuisable. Lorsqu'un corps est refroidi, il occupe un volume plus petit qu'auparavant; il est donc évident que ses molécules doivent s'être rapprochées les unes des autres. Lorsqu'un corps est dilaté par la chaleur, il est également évident que ses molécules doivent s'être éloignées les uns des autres. La cause immédiate du phénomène de la chaleur est donc du mouvement,

et les lois de la communication de la chaleur sont précisément les mêmes que les lois de la communication du mouvement.

« Puisque toute matière peut être amenée, par le refroidissement, à occuper un espace plus petit, il est évident que les particules de matière doivent avoir de l'espace entre elles; et puisque chaque corps peut communiquer le pouvoir d'expansion à un corps de température plus basse, c'est-à-dire peut animer les particules de ce corps d'un mouvement expansif, il est très-probable que ses propres particules sont elles-mêmes en possession d'un mouvement ; mais, comme il n'y a pas de changement dans la position de ses parties, aussi longtemps que la température est uniforme, le mouvement, s'il existe, doit être un mouvement vibratoire ou ondulatoire, ou un mouvement des particules autour de leurs axes, ou, enfin, un mouvement des particules les unes autour des autres.

« Il semble possible de rendre compte de tous les phénomènes de la chaleur, si l'on admet que, dans les solides, les particules sont dans un état constant de mouvement vibratoire, les particules des corps les plus chauds se mouvant avec la plus grande vitesse, et parcourant un plus grand espace ; que dans les liquides et les fluides élastiques, en outre du mouvement vibratoire, qui doit être conçu plus grand dans les derniers, les particules doivent être animées d'un mouvement de rotation autour de leurs propres axes, avec une vitesse différente, les particules des fluides élastiques se mouvant avec une plus grande vitesse; enfin que, dans les substances éthérées, les particules doivent se mouvoir autour de leurs propres axes, séparées les unes des autres, et s'élancer en droite ligne à travers l'espace. On peut concevoir que la température dépende de la vitesse des vibrations, et l'augmentation de capacité calorifique de ce que l'espace parcouru est plus grand. A son tour, l'abaissement de température, dans la conversion des solides en fluides ou en gaz, peut être expliquée par une perte de mouvement vibratoire, provenant de ce que les particules commencent à tourner autour de leur axe quand le corps devient fluide ou aériforme, ou par une diminution dans la vitesse de vibration, par suite du mouvement de translation dans l'espace dont les particules commenceraient à être animées. »

LEÇON IV

(13 FÉVRIER, 1862)

Instrument de Trevelyan. — Boules tournantes de Gore. — Influence de la pression sur le point de fusion. — Liquéfaction et lamination de la glace par la pression. — Dissection de la glace par un rayon calorifique. — Fleurs liquides et leurs taches centrales. — Propriétés mécaniques de l'eau purgée d'air. — Point d'ébullition des liquides : circonstances influentes. — Les Geisers de l'Islande.

APPENDICE. — Note sur l'instrument de Trevelyan. — Propriétés physiques de la glace.

Avant de quitter définitivement le sujet de la dilatation, je désire vous montrer une expérience qui met en évidence d'une manière curieuse et agréable la conversion de la chaleur en énergie mécanique. Le fait que je désire reproduire fut d'abord observé, par un certain M. Schwartz, dans une des fonderies de la Saxe.

On avait laissé se solidifier une certaine quantité d'argent qui venait d'être fondu dans une grande cuiller, et, pour hâter son refroidissement, on la tournait et retournait sur une enclume. Quelques instants après, un bourdonnement étrange se fit entendre dans l'atelier, et l'on finit par découvrir qu'il était produit par le lingot d'argent, qui se montra animé sur l'enclume d'un tremblement très-sensible.

Plusieurs années après, M. Arthur Trevelyan eut la bonne fortune d'avoir à se servir d'un fer à souder, qu'il plaça accidentellement contre un morceau de plomb. Bientôt après, son attention fut excitée par un son très-singulier, qu'il trouva,

après quelques recherches, provenir du fer à souder. Comme l'argent de Schwartz, le fer à souder se montra en état de vibration. M. Trevelyan fit de cette découverte le sujet d'une étude très-intéressante. Il détermina la meilleure forme à donner au *berceau* (c'est le nom qu'a reçu la masse vibrante); et l'instrument qu'il construisit est connu dans l'Europe entière sous le nom d'*instrument de Trevelyan*. Depuis cette époque, ce phénomène a été tour à tour étudié par MM. J. D. Forbes, Seebeck, Faraday, Sondhaus et moi.

Voici un berceau de ce genre fabriqué en laiton. Sa longueur, A C (fig. 26) est de 10 centimètres; sa largeur, A B, de 4 centimètres; la longueur du manche terminé par le bouton F est de 25 centimètres. Une rainure ou gouttière court le long du dos du berceau sur sa ligne médiane; M est une section transversale du berceau et de sa gouttière. Je le chauffe assez pour que sa température soit un peu plus élevée que celle de l'eau bouillante, et je le pose sur ce bloc de plomb, en laissant son bouton reposer sur la table. Vous entendez une succession rapide de coups assez forts; mais vous ne pouvez pas voir de loin les oscillations du berceau, cause des coups qu'il frappe. Pour vous les montrer, j'ai recours à cette baguette de cuivre A B (fig. 27), terminée par deux boules; les oscillations seront par là rendues beaucoup plus lentes, et vous pourrez suivre aisément des yeux le balancement alternatif de la baguette et des boules. Ce mouvement se continuera aussi longtemps que le berceau pourra céder une quantité suffisante de chaleur au *porteur*, sur lequel il repose. Nous avons ainsi rendu les vibrations plus lentes; mais je puis aussi les rendre plus rapides en me servant d'un berceau dont la gouttière soit plus large. Les flancs de ce berceau surplombent moins que ceux du dernier; c'est équivalemment un pendule plus court qui oscillera plus rapidement. Placé sur le

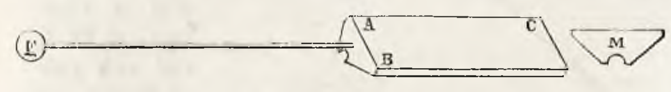


Fig. 26.

plomb, comme auparavant, il commence une musique discontinue et qui n'est guère amusante. Sans cesse en mouvement, sa voix est tantôt suppliante, tantôt pleine de reproches, comme si elle n'aimait pas le traitement qu'on lui fait subir. La voici qui devient moelleuse et remplit la salle de notes pleines et claires. Ses petits coups sont devenus périodiques et réguliers, et ils se sont unis pour produire des sons musicaux. Avec ce troisième berceau, à gouttière plus large encore, j'obtiendrai des sons plus aigus.

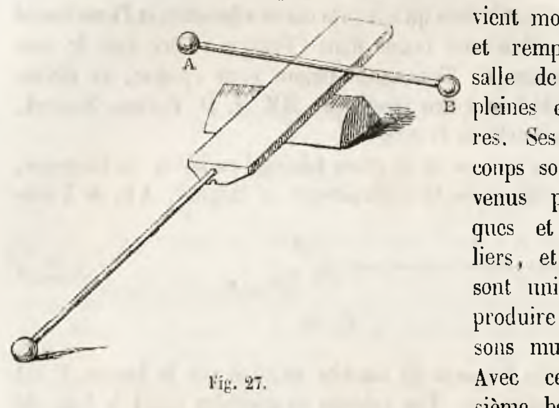


Fig. 27.

Vous savez tous que le son ou ton d'une note s'élève avec le nombre des vibrations. Le berceau à large gouttière oscille plus rapidement, et émet, par conséquent, une note plus aiguë. En projetant sur le berceau un rayon de lumière, je mettrai ses oscillations en évidence bien mieux qu'avec la verge armée de boules. Ce nouvel indicateur ne pèse pas, et, par conséquent, il ne ralentit pas le mouvement vibratoire du berceau. J'ai fixé sur celui-ci, avec une seule vis, en son centre, un petit disque d'argent poli, sur lequel tombe d'abord le faisceau de la lumière électrique, qui rebondit et va éclairer l'écran. Lorsque le berceau vibre, le faisceau vibre aussi, mais avec une vitesse angulaire double, et vous voyez comme le reflet de lumière se balance sur l'écran.

Quelle est la cause de ces vibrations et de ces notes singulières? Elles sont dues simplement à l'expansion soudaine, par la chaleur, du corps sur lequel repose le berceau. Chaque fois que le berceau chaud arrive en contact avec son porteur en plomb, il

se forme subitement sur celui-ci un mamelon, effet nécessaire de la chaleur reçue par le plomb au point de contact. Le berceau bascule, et un autre de ses points vient en contact avec le plomb; il en résulte un second mamelon suivi d'un second mouvement de bascule, etc. Soit A B (fig. 28) la surface du plomb, et R ou L

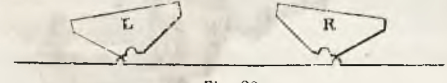


Fig. 28.

la section transversale du berceau chaud : lorsqu'il penche à droite, le mamelon se forme en R; s'il penche à gauche, le mamelon se forme en L. Aussi longtemps donc que sa température sera suffisamment élevée, le berceau sera sans cesse ballotté de droite à gauche et de gauche à droite, et la succession des petits coups qu'il frappe contre le plomb fera naître un son musical.

J'ai fixé ici deux lames de plomb dans un étau; leurs bords sont saillants, et à distance d'un peu plus d'un centimètre. Je mets en équilibre, en travers de ces deux arêtes de plomb, une longue barre de laiton chauffé. La barre pose d'abord sur une des arêtes, qui se dilate au point de contact et la repousse de bas en haut; elle porte alors sur la seconde arête, qui la repousse aussi; elle ira ainsi d'une arête à l'autre, et continuera d'osciller aussi longtemps qu'elle pourra communiquer au plomb une chaleur suffisante. Cette pelle à feu réussira aussi bien que la barre faite exprès. Je mets la pelle chauffée en équilibre sur une des arêtes de plomb, et vous constatez qu'elle oscille exactement comme le faisait la barre (fig. 29). Je puis ajouter qu'en posant convenablement le berceau ou la pelle à feu, et qu'en les soutenant légèrement par le manche, pour empêcher qu'il n'y ait de frottement, vous pourrez obtenir des notes aussi douces et aussi musicales que celles que je vous ai d'abord fait entendre. Une simple bague chauffée et mise de champ sur une plaque de plomb peut très-bien vibrer et chanter; et il en est de même d'un penny ou d'une demi-couronne[1].

[1] Pour plus ample information, voyez l'appendice à cette leçon.

Considérée du point de vue de la connexion entre les forces naturelles, cette expérience présente un grand intérêt. Les atomes

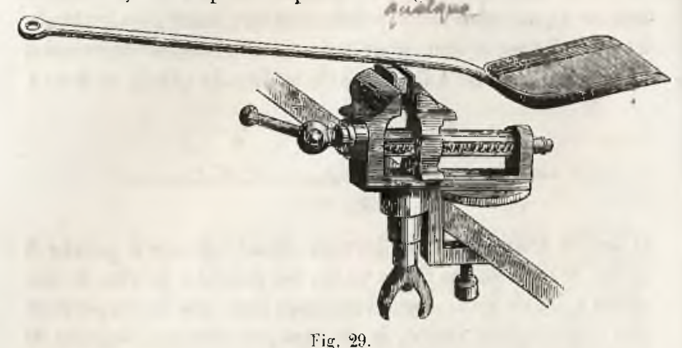


Fig. 29.

des corps sont infiniment petits, mais leur nombre est aussi infiniment grand. L'accroissement d'amplitude des vibrations de chaque atome, par la chaleur, est insensible ; mais en s'ajoutant en nombre presque infini, ces accroissements infiniment petits prennent une valeur sensible. Cette sommation, presque instantanée, donne naissance à notre mamelon, et le mamelon fait culbuter la masse pesante du berceau. Il y a, dans ce cas, conversion directe de la chaleur en mouvement mécanique ordinaire. Mais le berceau, repoussé, culbute par son propre poids, et, dans son choc contre le bloc, il rend la presque totalité de la chaleur dépensée pour le soulever. Cette fois, il y a conversion directe en chaleur de la force de la pesanteur. Le berceau est environné, en outre, d'un milieu capable d'être mis à son tour en mouvement. L'air de cette salle pèse quelques tonnes, et chacune de ses particules est ébranlée par le berceau ; il en est de même des membranes des tympans et des nerfs auditifs de toutes les personnes ici présentes ; avec conversion en son d'une portion de chaleur du berceau. Enfin, chaque vibration sonore qui est propagée par l'air de cette salle et qui va se briser contre les murs, les siéges et les coussins, etc., est convertie de nouveau en chaleur, forme première de ce cercle d'actions et de transformations successives.

Voici un autre effet curieux, dont nous sommes redevables à M. George Gore, et qui admet une explication toute semblable. Vous voyez ces rails ou ces deux bandes de cuivre, SS, S'S' (fig. 30), placées de champ, et distantes d'environ 2 centi-



Fig. 30.

mètres et demi. Je place cette boule creuse de métal, B, sur les rails : si je la pousse, elle roule ; mais si je ne la pousse pas, elle reste en repos. Je fais communiquer les deux rails, par les fils *w*, *w'*, avec les deux pôles d'une pile voltaïque. Un courant électrique va d'abord d'un des rails à la boule métallique, puis de la boule à l'autre rail, pour revenir enfin à la pile. En passant d'un rail à la boule et de la boule à l'autre rail, le courant rencontre de la résistance, et chaque fois qu'un courant rencontre de la résistance il y a de la chaleur développée. De la chaleur est donc engendrée aux points de contact de la boule avec les rails; et cette chaleur détermine une élévation du rail en ces deux points. Voyez l'effet produit. La boule qui, un instant auparavant, était tranquille, est maintenant très-mal à son aise. Elle vibre d'abord quelque peu sans rouler ; puis elle parcourt, en roulant, un petit espace, s'arrète et roule de nouveau. Ses excursions augmentent peu à peu ; la voilà qui va plus loin que je ne voulais ; elle est sortie des rails, et s'est bosselée en tombant sur le plancher.

Ce second appareil m'a été donné par M. Gore lui-même; les rails forment deux anneaux concentriques ; et, lorsque le circuit est établi, la boule F (fig. 31) fait en roulant le tour du cercle. M. Gore a aussi obtenu la rotation de boules légères, en les plaçant sur des rails circulaires de cuivre chaud, la force *roulante* dans ce cas, étant la même que la force *berçante* de l'instrument de Trevelyan.

Dans ma dernière leçon, j'ai rendu évidente pour vous la dila-

tation de l'eau dans son passage de l'état liquide à l'état solide ; pour beaucoup d'autres substances la solidification est, au con-

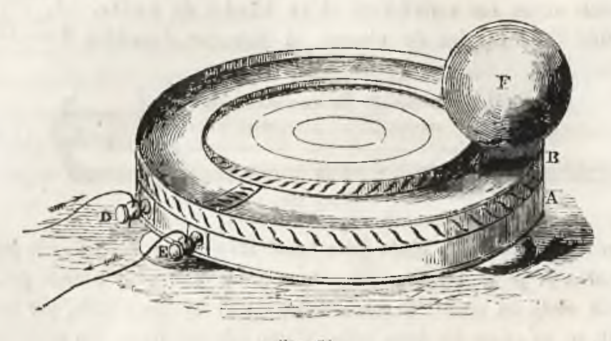


Fig. 51.

traire, accompagnée de contraction. Dans ce plat rond en verre, je verse de l'eau chaude; et de cette cuiller, je laisse tomber sur l'eau une certaine quantité de cire d'abeille fondue. La cire forme actuellement sur l'eau une couche liquide d'un peu plus d'un centimètre d'épaisseur. Nous allons laisser refroidir ensemble l'eau et la cire : lorsqu'elles seront froides, vous verrez que la cire qui maintenant recouvre entièrement la surface de l'eau et adhère aux bords sur tout le contour du vase, se contractera, et nous obtiendrons finalement un gâteau de cire beaucoup moins large que le plat.

La cire se *dilate* donc en passant de l'état solide à l'état liquide. Pour prendre la forme liquide, ses particules ont besoin d'être séparées par une plus grande distance; un certain jeu entre les particules est la condition nécessaire de la liquidité. Mais empêchons la dilatation de la cire en lui opposant une force mécanique extérieure. Concevons un vase complétement rempli de cire non fondue et qui soit assez solide pour résister à la dilatation de la cire qu'il contient. A quoi devez-vous vous attendre si vous essayez de liquéfier la masse de cire du vase fermé? Lorsque la cire est libre, la chaleur a seulement à vaincre l'attraction de ses propres particules, mais quand la cire est renfermée dans un vase résistant,

en outre de l'attraction des particules, la chaleur doit surmonter la résistance offerte par le vase.

Nous arrivons ainsi, par le simple raisonnement, à conclure qu'il faudra plus de chaleur pour fondre la cire sous pression que lorsqu'elle est libre; ou, en d'autres termes, que le point de fusion de la cire *s'élève* quand la pression augmente. Cette conclusion est complétement justifiée par l'expérience, non-seulement pour la cire, mais pour d'autres substances qui se contractent en se solidifiant, et se dilatent en se liquéfiant. MM. Hopkins et Fairbairn ont élevé, par la pression, de 10 ou 20° le point de fusion de quelques substances qui se contractent considérablement en se solidifiant.

Ces expériences ~~conduisent à une conséquence~~ se lient à un résultat très-remarquable. On sait que la température de la terre augmente à mesure qu'on descend à une plus grande profondeur, et l'on a calculé la profondeur à laquelle tous les corps terrestres connus devraient être à l'état de fusion. M. Hopkins, cependant, fait remarquer qu'en raison de la pression énorme causée par les couches qui leur sont superposées, les couches les plus basses doivent exiger pour fondre une température bien supérieure à celle qui déterminerait la fusion des couches situées près de la surface. Et il en conclut que l'écorce solide du globe doit avoir une épaisseur considérablement plus grande que celle qui lui est assignée par le calcul, quand on admet le même point de fusion pour les couches superficielles et profondes.

Revenons maintenant de la cire à la glace. La glace en se liquéfiant se *contracte;* l'arrangement de ses atomes, pour constituer un solide, exige plus d'espace qu'il n'en faut pour qu'elle reste à l'état liquide. Cette différence est due sans aucun doute à la cristallisation; les pôles attractifs des molécules sont placés de telle sorte que lorsque la force cristallisante entre en jeu, les molécules s'unissent de manière à laisser dans la masse de plus grands espaces interatomiques. Nous pouvons supposer que les molécules s'accrochent par leurs angles, et que leurs angles en tournant pour venir se joindre déterminent l'écartement des centres atomiques. En tout cas, les centres s'éloignent les uns des

autres lorsque la solidification a lieu. Le refroidissement est donc la cause de l'écart des centres atomiques et de l'augmentation de volume qui en est la suite. Dans ce cas, évidemment, la pression empêcherait l'expansion qui doit précéder nécessairement la solidification, et, par conséquent, s'il s'agit de l'eau, la tendance de la pression sera de la maintenir liquide. En raisonnant ainsi, nous arrivons à cette conclusion que les points de fusion des substances qui se dilatent en se solidifiant, sont *abaissés* par la pression.

M. le professeur James Thomson attira, le premier, l'attention sur cette particularité, et ses conclusions théoriques ont été vérifiées par les expériences de son frère, M. le professeur William Thomson. Faisons ressortir la vérité de ces principes par une expérience frappante. J'ai ici un morceau de glace rectangulaire de 3,8 centimètres de hauteur, de 6,4 centimètres carrés de base. La température de la glace est maintenant 0°; mais, si je viens à la presser, j'abaisserai son point de fusion; la glace comprimée se fondra à une température au-dessous de 0°; et par suite la température actuelle surpasse la température à laquelle elle fondra sous pression. J'ai taillé cette glace de manière que ses plans de congélation fussent perpendiculaires à la hauteur. La direction des bulles d'air stratifiées qu'on voyait dans le bloc où ce morceau transparent a été pris me donnait le moyen de reconnaître immédiatement ces plans de congélation. Cela posé, je dresse la colonne de glace, L, entre deux morceaux plats de buis, B B′ (fig. 32); je place le tout entre les plaques de cette petite presse hydraulique; et je fais passer à travers la glace un faisceau de lumière électrique. Une lentille installée en avant de la glace reçoit le rayon lumineux, et projette sur l'écran tendu devant vous une image agrandie du morceau de glace : le faisceau lumineux qui traverse la glace a été préalablement purifié, c'est-à-dire dépouillé de la plus grande partie de sa chaleur; de sorte que, quoiqu'il soit encore un peu chaud, il ne l'est pas assez pour fondre la glace; aussi vous voyez qu'il la traverse sans déterminer sa liquéfaction. J'appuie sur le bras de levier de la presse; la pile de glace est comprimée doucement entre les deux

morceaux plats de buis. Je presse avec précaution, et vous voyez déjà des bandes obscures se montrer dans la glace, perpendicu-

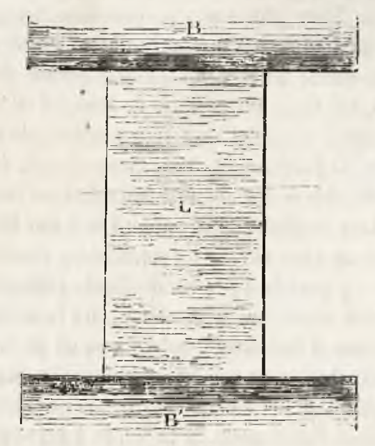


Fig. 32.

lairement à la direction de la pression. Elles apparaissent droit au centre de la masse; à mesure que je continue la pression, les anciennes bandes s'étendent et de nouvelles surgissent. La colonne entière est maintenant sillonnée de ces stries. Que sont-elles? Ce sont simplement des couches liquides vues de tranche; et, si vous examinez attentivement la colonne, si vous regardez obliquement dans son intérieur, vous arriverez à voir ces surfaces liquides. Nous avons liquéfié la glace dans des plans perpendiculaires à la pression, et ces plans liquides alternant avec la glace lui donnent l'apparence lamellaire fortement prononcée qu'elle prend sous vos yeux[1].

Solide, liquide ou gaz, l'eau est une des substances les plus admirables de la nature. Étudions encore quelque peu ses merveilles. A toutes les températures au-dessus de 32° Fahr. ou de 0° C., le mouvement de chaleur est suffisant pour tenir les molécules de l'eau dégagées de leur union rigide. Mais à 0° C. le mou-

[1] Voyez l'appendice de cette leçon, pour plus ample information

vement est si réduit que les atomes s'accrochent alors les uns les autres et s'unissent en un solide. Cette union, toutefois, est soumise à des lois. Pour plusieurs des personnes ici présentes, ce bloc de glace ne semble pas présenter plus d'intérêt et de beauté qu'un bloc de verre; mais, pour l'esprit éclairé du savant, la glace est au verre ce qu'un oratorio de Haendel est aux cris de la rue ou du marché. La glace est une musique, le verre est un bruit; la glace est l'ordre, le verre est la confusion. Dans le verre, les forces moléculaires ont abouti à un écheveau embrouillé, inextricable; dans la glace, elles ont su tisser une broderie régulière dont je veux vous révéler les miraculeux dessins.

Comment m'y prendrai-je pour disséquer cette glace? Un faisceau de lumière solaire, ou, à son défaut, un faisceau de lumière électrique seront l'anatomiste habile auquel je confierai cette opération. J'écarte l'agent qui, dans la dernière expérience, purifiait ou dépouillait de chaleur notre faisceau lumineux; et je lance ce faisceau directement de la lampe à travers cette plaque de glace transparente. Il mettra en pièces l'édifice de glace, en renversant exactement l'ordre de son architecture. La force cristallisante avait silencieusement et symétriquement élevé atome sur atome; le faisceau électrique les fera tomber silencieusement et symétriquement. Je dresse cette plaque de glace en face de la lampe, et la lumière passe maintenant à travers sa masse. Comparez le faisceau lumineux entrant avec le faisceau lumineux sortant de la glace; pour l'œil, il n'y a pas de différence sensible; l'intensité de la lumière est à peine diminuée. Il n'en est pas ainsi de la chaleur. En tant qu'agent thermique, le faisceau, avant son entrée, est bien plus puissant qu'après son émergence. Une portion du faisceau s'est arrêtée dans la glace, et cette portion est l'anatomiste que nous voulions mettre en jeu. Que fait-il? Je place une lentille en avant de la glace, et je projette une image agrandie de la plaque de glace sur l'écran. Observez cette image (fig. 33), dont la beauté est encore bien loin de l'effet réel. Voici une étoile; en voilà une autre; et à mesure que l'action continue, la glace paraît se résoudre de plus en plus en étoiles, toutes de six rayons, et ressemblant chacune à une belle fleur

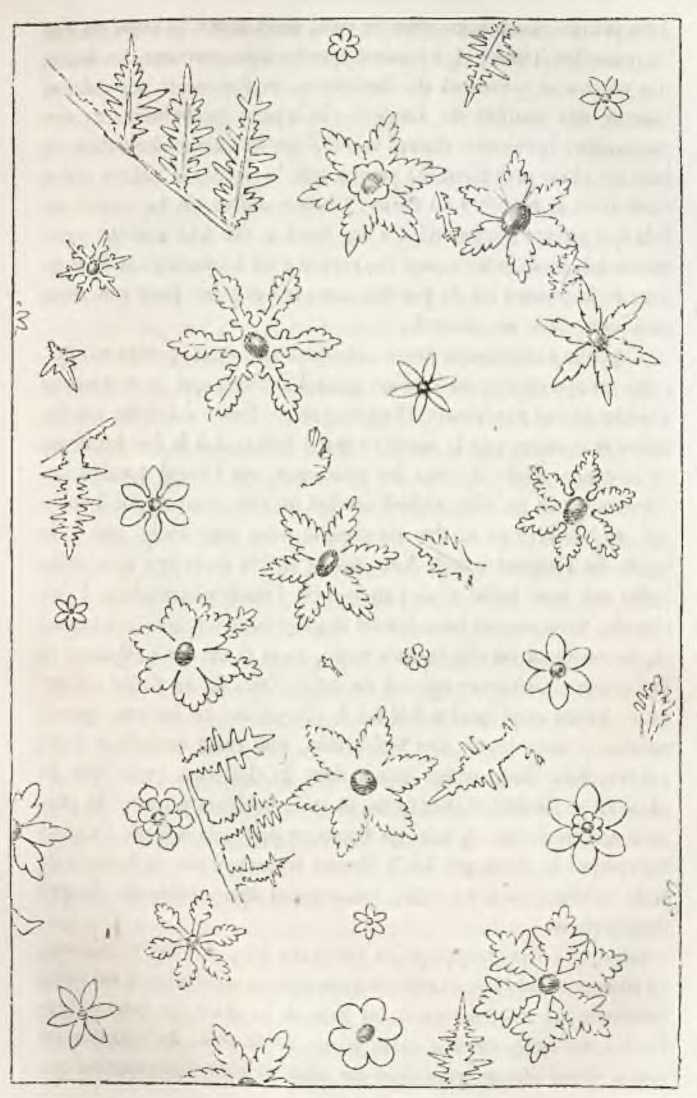


Fig. 33.

à six pétales. En faisant aller et venir ma lentille, je mets en vue de nouvelles étoiles; et, à mesure que l'action continue, les bords des pétales se couvrent de dentelures, et dessinent sur l'écran comme des feuilles de fougère. Très-peu, probablement, des personnes ici présentes étaient initiées aux beautés cachées dans un bloc de glace ordinaire. Et pensez que la prodigue nature opère ainsi dans le monde tout entier. Chaque atome de la croûte solide qui couvre les lacs glacés du Nord a été fixé suivant cette même loi. La nature dispose ses rayons avec harmonie; et la mission de la science est de purifier assez nos organes pour que nous puissions saisir ses accords.

J'appelle maintenant votre attention sur deux points minuscules en apparence, mais d'un grand intérêt, qui se rattachent à cette même expérience. Vous voyez ces fleurs éclairées par lumière transmise, par la lumière qui a traversé à la fois les fleurs et la glace. Mais si vous les examinez, en faisant tomber sur elles un rayon qu'elles réfléchiront et qu'elles renverront à votre œil, vous verrez au centre de chaque fleur une tache qui a le lustre de l'argent bruni. Vous seriez tentés de croire que cette tache est une bulle d'air; mais, en l'immergeant dans l'eau chaude, vous pouvez faire fondre la glace tout autour de la tache; et, au moment où elle restera seule, vous la verrez s'affaisser et disparaître, sans trace aucune de bulle d'air. *Cette tache est un vide*. Voyez avec quelle fidélité à elle-même la nature opère; combien, dans toutes ses opérations, elle reste enchaînée à ses propres lois. Nous avons appris dans la dernière leçon que la glace en se fondant se contracte, et cette contraction nous la prenons ici sur le fait. L'eau des fleurs ne peut pas remplir l'espace occupé par la glace qui lui a donné naissance par sa fusion; de là la production d'un vide, compagnon inséparable de chaque fleur liquide.

Lorsque j'observai, pour la première fois, ces belles figures, au moment où la tache centrale apparaissait semblable à un point lumineux né soudainement au sein de la glace, je crus entendre un son aigu, comme si la glace se fendait. Je soupçonnai tout d'abord que ce bruit était un effet de mon imagination qui

associait le son à l'apparition de la tache, comme on dit que le peuple associe souvent un bruit imaginaire, et qu'il n'a pas réellement entendu, à l'apparition des bolides ou des aurores boréales. Ce son aigu était cependant une réalité, et, si vous me le permettez, je partirai de ce fait vulgaire pour vous ramener, à travers une série de phénomènes intéressants, à une question de science pratique très-éloignée.

Toute eau contient une grande quantité d'air à l'état de dissolution ; en la faisant bouillir, vous pouvez mettre en liberté cet air emprisonné. Si vous chauffez une bouteille d'eau, vous voyez les parois du vase se couvrir de bulles d'air longtemps avant que l'eau entre en ébullition, vous voyez les bulles monter à travers le liquide sans se condenser et flotter au sommet de la bouteille. Un des effets les plus remarquables de cet air dans l'eau est de provoquer l'ébullition du liquide. Il agit comme une sorte de ressort élastique, écartant l'un de l'autre les atomes de l'eau et les aidant ainsi à prendre la forme gazeuse.

Supposons maintenant que cet air a été enlevé. Ayant perdu les coussins qui les séparaient, les molécules se tiennent bien plus étroitement embrassées. La cohésion de l'eau est considérablement augmentée par le départ de l'air. Voici un tube de verre, le marteau d'eau, c'est le nom qu'on lui donne, dans lequel on a renfermé de l'eau purgée d'air. Un des effets de l'enlèvement de ces tampons élastiques, est que l'eau en tombant, rend le son d'un corps solide. Vous entendez comme le liquide retentit contre l'extrémité du tube, quand je le tourne sens dessus dessous. Voici un autre tube A B C (fig. 34), courbé en forme de V, et destiné à montrer combien la cohésion de l'eau est modifiée par une longue ébullition. J'amène l'eau dans un des bras du V; en inclinant le tube elle coule librement, comme vous le voyez, dans l'autre bras. Je la ramène au premier bras, et maintenant je frappe légèrement ce bras contre la table. Vous entendez d'abord un son discontinu comme un tintement. Tant que ce premier bruit se fait entendre, l'eau n'est pas réellement en contact avec la surface du tube. Je continue à frapper : vous remarquez une altération dans la nature du son; le tintement a disparu; le son est sec, comme

celui d'un solide frappant contre un solide. Je relève mon tube. Voyez ce qui arrive. Je rends verticale la colonne d'eau, sans



Fig. 54.

qu'elle quitte la branche AB. Ses molécules adhèrent avec tant de ténacité aux parois du tube, et se tiennent ensemble si serrées, qu'elle refuse de se comporter comme un liquide, qu'elle cesse d'obéir à la loi de la gravité.

Voilà pour l'augmentation de cohésion; mais cette même cohésion rend les liquides capables de résister à l'ébullition. De l'eau ainsi purgée d'air peut être élevée à une température de 100° et plus, au delà de son point d'ébullition ordinaire, sans bouillir. Et remarquez ce qui a lieu quand le liquide bout. Il commence par faire une énorme provision de chaleur; les atomes serrés l'un contre l'autre se faussent enfin compagnie; mais ils le font avec la violence d'un ressort qui se rompt subitement sous une forte tension, et l'ébullition est convertie en explosion. Nous sommes redevables à M. Donny, de Gand, de la découverte de cette propriété de l'eau.

Revenons maintenant à notre glace. L'eau, en se congélant, exclut complétement l'air de son architecture cristalline. Tout corps étranger est éliminé dans l'acte de la congélation, et la glace ne contient pas d'air en dissolution. Si donc nous venons à fondre un morceau de glace pure dans des conditions où l'air ne puisse pas en approcher, nous aurons de l'eau à son maximum de cohésion; et cette eau, si on vient à la chauffer, présentera les phénomènes que je viens de rappeler. Qu'elle se comporte ainsi, c'est ce qui a été prouvé par M. Faraday. Ayant fait fondre de la glace pure sous de l'essence de térébenthine, il trouva que le liquide obtenu pourrait être chauffé bien au delà de son point d'ébullition; et que la rupture du liquide, dans l'acte de l'ébullition, avait lieu presque avec la violence d'une explosion. Appliquons maintenant ces faits aux fleurs de glace à six pétales, et à leur petite étoile centrale. Elles se forment en un lieu où l'air ne peut pas pénétrer. Voyez la fleur se former et croître graduellement en dimension. La cohésion du liquide est si grande que, plutôt que de céder la place, il traversera les murs de sa prison, ou préférera augmenter de volume; mais quand ses dimensions ont augmenté, l'espace qu'il tend à occuper est trop grand pour lui, jusqu'à ce qu'enfin le liquide éclate; un vide se forme, et un tintement est entendu.

Jetons un dernier coup d'œil sur cet ensemble de relations. Il est vraiment remarquable qu'un grand nombre de locomotives ont fait explosion en quittant le hangar où elles étaient restées quelque temps en repos. Le nombre d'explosions survenues juste au moment où le mécanicien ouvrait son robinet de vapeur est tout à fait surprenant. Or supposons que l'eau de la locomotive a bouilli assez longtemps pour que tout l'air qu'elle contenait ait été expulsé. Cette eau alors possédera à un degré plus ou moins élevé cette puissance de cohésion sur laquelle j'ai attiré votre attention. On conçoit aussi que pendant que la locomotive est restée en repos, attendant l'ordre du départ, la chaleur s'est accumulée en excès dans l'eau du générateur; or cet approvisionnement excessif de chaleur une fois admis, quand le mécanicien ouvrira son robinet de vapeur, il déterminera mécaniquement la rupture de

la cohésion, et il y aura génération instantanée de vapeur explosive. Je ne prétends pas affirmer qu'il en soit ainsi, mais qui pourrait dire que cela n'est pas? Nous sommes certainement en présence d'un agent réel, très-capable, si l'on invoque sa puissance, de produire les plus terribles effets.

Nous venons de toucher au sujet de la vapeur; arrêtons-nous quelques minutes de plus à la considération de sa formation et de son action. Quand vous ajoutez de la chaleur, ou, en d'autres termes, du mouvement à l'eau, les particules s'échappent de sa surface libre en nombre toujours croissant. Nous approchons de plus en plus de ce qu'on appelle le *point d'ébullition* du liquide, où la conversion en vapeur n'est plus limitée à la surface libre, mais devient plus abondante au fond du vase auquel la chaleur est appliquée. Lorsque de l'eau bout dans une coupe de verre, on voit la vapeur s'élever en sphère du fond jusqu'à la surface, où souvent elle flotte pendant quelque temps enveloppée par en haut d'une pellicule liquide en forme de dôme.

Pour produire ces bulles, il faut vaincre certaines résistances. Nous avons d'abord l'adhérence de l'eau au vase qui la contient, adhérence qui varie avec la substance du vase. Dans le cas d'un vase de verre, par exemple, l'adhérence peut élever le point d'ébullition de deux ou trois degrés; ce qui est impossible avec des vases en métal. L'adhérence est vaincue par accès et par saillies dont la brusquerie peut être réellement augmentée par addition de sels à l'eau; l'ébullition est accompagnée d'un son grave et intense. Quelquefois, l'adhérence est vaincue si soudainement et si violemment, que le liquide saute en masse du vase.

Un second antagonisme à l'ébullition du liquide est la cohésion entre les particules liquides, cohésion qui, comme nous l'avons vu, peut devenir très-forte quand le liquide est purgé d'air. Cela est vrai non-seulement pour l'eau, mais pour d'autres liquides : pour les éthers et les alcools, par exemple. Si l'on met en communication avec la machine pneumatique un petit flacon contenant de l'éther ou de l'alcool, on voit se produire une ébullition violente au premier moment du jeu des pistons : mais après que

tout l'air a été enlevé, on peut continuer longtemps à pomper, sans produire d'ébullition sensible ; la surface libre du liquide émet seule de la vapeur.

Mais, pour qu'elle se forme en bulles dans l'intérieur d'une masse liquide, la vapeur doit vaincre deux autres résistances : le poids de l'eau située au-dessus d'elle, et le poids de l'atmosphère qui pèse sur l'eau. On peut mettre comme il suit en évidence ce dont l'atmosphère est capable. Voici un vase de fer-blanc contenant de l'eau que je maintiens en ébullition avec cette petite lampe. En ce moment, tout l'espace au-dessus de l'eau est rempli de vapeur qui s'échappe par ce robinet. Je ferme le robinet, je retire la lampe, et je verse de l'eau froide sur le vase de fer-blanc. La vapeur intérieure est condensée, le coussin élastique qui pressait les parois de dedans en dehors, en sens opposé de la pression atmosphérique, est supprimé ; voyez ce qui résulte ! Les parois du vase sont écrasées et déformées par la pression atmosphérique. Cette pression s'élève en nombre rond à un kilogramme par centimètre carré. Comment donc une chose aussi frêle qu'une bulle de vapeur peut-elle exister à la surface de l'eau bouillante? Simplement parce que la force élastique de la vapeur à l'intérieur de la bulle est exactement égale à la pression de l'atmosphère au dehors ; la pellicule liquide est pressée entre deux coussins élastiques qui se neutralisent exactement l'un l'autre. Si la vapeur était prédominante, la bulle devrait éclater de dedans en dehors ; si la pression de l'air venait à prédominer, la bulle devrait crever de dehors en dedans. Ceci nous conduit à la vraie définition du point d'ébullition d'un liquide. C'est la température à laquelle la tension de la vapeur fait exactement équilibre à la pression atmosphérique.

A mesure que nous nous élevons sur une montagne, la pression atmosphérique diminue, et le point d'ébullition s'abaisse d'une quantité correspondante. Un matin, en août 1859, j'ai trouvé que la température de l'eau bouillante au sommet du mont Blanc était de 84°,97, inférieure de 15 degrés à la température d'ébullition au niveau de la mer. Le 3 août 1858, la température de l'eau bouillante, sur le sommet du Fins-

teraarhorn, était de 86°,1. Le 10 août 1858, le point d'ébullition au sommet du mont Rose était de 84°,95. Sur le mont Rose, le point d'ébullition de l'eau déterminé par l'observation s'est trouvé presque le même qu'au sommet du mont Blanc, quoique la hauteur du mont Blanc surpasse d'environ 150 mètres celle du mont Rose. Les fluctuations du baromètre suffisent parfaitement à rendre compte de cette anomalie. L'abaissement du point d'ébullition est de 1° centigr. environ pour chaque 324 mètres que nous montons; et de la température à laquelle l'eau bout, nous pouvons déduire approximativement la hauteur du lieu d'observation.

On dit qu'à Londres, pour faire du thé parfait, l'eau bouillante est absolument nécessaire. S'il en est ainsi, on ne pourrait pas se procurer cette boisson dans toute son excellence aux stations les plus élevées des Alpes.

Prouvons maintenant expérimentalement que le point d'ébullition dépend de la pression extérieure. Voici un flacon F (fig. 35), contenant de l'eau; en voici un autre bien plus grand, G, dans lequel j'ai fait le vide au moyen de la machine pneumatique. Les deux flacons sont unis ensemble par un système de robinets qui me permet d'établir une communication entre eux. L'eau dans le petit flacon a été maintenue bouillante pendant quelque temps, et la vapeur s'échappait par le robinet y. Je retire maintenant la lampe à l'esprit-de-vin, et je tourne le robinet y, pour empêcher l'air d'entrer. L'eau cesse de bouillir, et de la vapeur pure remplit maintenant l'espace situé au-dessus de l'eau. Donnons à l'eau le temps de se refroidir un peu. De temps en temps vous voyez s'élever une bulle de vapeur, parce que la pression de la vapeur située au-dessus diminue de plus en plus par sa condensation lente. Je hâte la condensation en versant de l'eau froide sur le col du flacon, les bulles sont engendrées en plus grande abondance. En plongeant le flacon tout entier dans l'eau froide, je pourrais la faire bouillir avec violence. L'eau est maintenant en repos, à quelques degrés au-dessous de son point d'ébullition. Je tourne le robinet c, qui ouvre à la vapeur le passage dans le vase vide G; aussitôt la pression dimi-

nue, l'ébullition recommence en F ; et voyez comme la vapeur condensée se dépose sous forme de rosée sur les parois du vase vide. En provoquant à dessein cette condensation, et en empêchant ainsi la vapeur du grand ballon de réagir sur la surface de l'eau, nous pouvons faire que le petit flacon

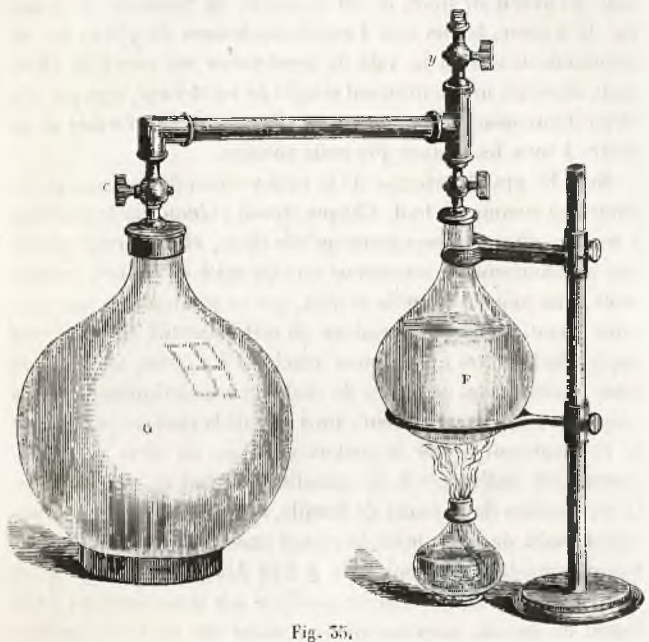


Fig. 35.

continue à donner des bulles et à bouillir pendant un temps considérable.

Si l'on élève assez la température, la force élastique de la ~~chaleur~~ peut devenir énorme. Le marquis de Worcester lui a fait crever un canon, et les désastreuses explosions de nos chaudières sont des preuves trop éloquentes de sa puissance. Mais le génie de l'homme est parvenu à la gouverner, même dans toute sa puissance. Par elle, Denis Papin a soulevé un piston qui retombait, pressé par l'atmosphère, lorsque la vapeur intérieure venait à

tre condensée. Savary et Newcomen l'ont assujettie à un travail pratique; et James Watt a résolu de la manière la plus complète le grand problème du pouvoir moteur de la chaleur. En élevant le piston de bas en haut par la vapeur, tandis que l'espace au-dessus du piston est en communication avec le vide du condenseur ou avec l'air libre, et en abaissant de nouveau le piston par la vapeur, tandis que l'espace au-dessous du piston est en communication avec le vide du condenseur ou avec l'air libre, nous obtenons un mouvement simple de va-et-vient, qui, par des dispositions mécaniques, peut prendre toutes les formes et se prêter à tous les usages que nous voulons.

Mais le grand principe de la conservation de la force se retrouve ici comme partout. Chaque travail exécuté par la machine à vapeur, chaque kilogramme qu'elle élève, chaque roue qu'elle met en mouvement, consomme une quantité de chaleur équivalente. Une tonne de houille fournit, par sa combustion, une certaine quantité définie de chaleur. Si cette quantité de houille est appliquée à mettre en jeu une machine à vapeur, ou que l'on fasse la somme des quantités de chaleur communiquées, soit à la machine, soit au condenseur, ainsi que de la chaleur perdue par le rayonnement et par le contact de l'air, on verra que cette somme est inférieure à la quantité de chaleur produite par la combustion de la tonne de houille, et la différence sera l'équivalent exact de la quantité de travail exécuté. Supposons que le travail consiste en un poids de 4 240 kilogrammes élevé à un mètre de hauteur, la chaleur produite par la combustion de la tonne de houille surpasserait la somme des chaleurs perdues d'une quantité juste suffisante à élever de 10 degrés la température d'un kilogramme d'eau.

Mais mon but, dans ces leçons, est de traiter de la nature, et non de l'art ou de l'industrie; et le temps trop court dont nous disposons me force à passer rapidement sur le triomphe remporté par le génie de l'homme dans l'application de la vapeur aux usages de la vie. Ceux qui ont visité les ateliers de Woolwich, ou quelques-unes de nos grandes usines où les machines sont employées sur une si large échelle, auront été suffisamment

impressionnés des ressources immenses que cette puissance souveraine met à la disposition de l'homme. Mais ce qu'il ne faut pas oublier, c'est que chaque roue qui tourne, chaque ciseau, chaque rabot, chaque scie, chaque tarière qui s'ouvre un passage au travers des masses de fer, comme si elles n'étaient plus que du beurre, tirent leur puissance motrice du choc des atomes dans la fournaise. Le mouvement de ces atomes se communique à la chaudière, puis à l'eau, dont les particules sont contraintes de se séparer et de se fuir les unes les autres avec une énergie répulsive proportionnée à la chaleur communiquée. La vapeur est simplement l'intermédiaire par lequel le mouvement atomique est converti en mouvement mécanique. Ce mouvement mécanique, à son tour, peut engendrer le mouvement atomique qui fut son père. Voyez les instruments à planer, voyez les intruments à forer : des torrents d'eau coulent à leur surface pour les maintenir froids. Prenez les copeaux frisés de fer que la raboteuse a détachés, vous ne pouvez pas les tenir dans vos mains tant ils sont chauds. Ici, la force motrice est rendue à sa première forme; l'énergie de la machine a été consumée dans l'acte de reproduction de la puissance qui l'avait fait naître.

Je dois maintenant appeler votre attention sur une machine à vapeur naturelle qui, depuis longtemps, a pris rang parmi les merveilles du monde : je veux parler du Grand Geyser d'Islande. Le sol de l'Islande s'élève graduellement des côtes vers le centre, où le niveau général est d'environ 600 mètres au-dessus de la surface de la mer. Sur ce plateau central, comme sur un piédestal, se dressent les Jökulls ou montagnes de glace, qui s'étendent des deux côtés dans la direction du nord-est. Les volcans actifs de l'île se rangent le long de cette chaîne, et les sources thermales suivent la même direction générale. Des cônes et des cratères adossés à ces montagnes s'échappent d'énormes masses de vapeurs que l'on entend par intervalles siffler et mugir; et lorsque l'issue des vapeurs se trouve à l'ouverture d'une caverne, la résonnance de la caverne donne souvent au son produit l'éclat du tonnerre. Plus bas, dans les couches plus poreuses, ce

sont des mares fumantes de boue; une pâte alumineuse d'un bleu noir repoussant, sans cesse en ébullition, se soulève de temps en temps en bulles énormes qui crèvent et lancent leur écume gluante à une hauteur de 5 à 6 mètres. Les glaciers partent en montant de la base des collines; au-dessus s'étendent les champs de neige qui couronnent leurs sommets. Des voûtes et des fentes des glaciers s'échappent de grandes masses d'eau qui tombent quelquefois en cascades sur des murs de glace, et s'étendent sur la contrée en nappes de plusieurs kilomètres, avant de trouver une issue définitive. Il se forme ainsi de vastes marais qui ajoutent leur désespérante monotonie à la scène déjà si lugubre qui se déroule sous les yeux du voyageur. Interceptée par les crevasses ou fissures du sol, une partie de cette eau descend jusqu'aux roches brûlantes de l'intérieur du sol; et là, rencontrant les gaz volcaniques qui traversent en tous sens ces régions souterraines, elles cheminent avec eux pour s'échapper à la première occasion favorable, en jets de vapeur ou d'eau bouillante. La plus fameuse de ces sources jaillissantes est le Grand Geyser : c'est un tube de 23 mètres de profondeur et de 3 mètres de diamètre, surmonté d'un bassin qui mesure en travers 16 mètres du nord au sud et 18 mètres de l'est à l'ouest. L'intérieur du tube et du bassin est revêtu d'une couche siliceuse très-unie, si dure qu'elle résiste aux coups de marteau; et la première question qui se présente est celle-ci : Comment ce tube merveilleux a-t-il été construit? comment ce stuc si admirable s'est-il appliqué sur ses parois? L'analyse chimique montre que l'eau tient de la silice en dissolution, et l'on pourrait par conséquent conjecturer que l'eau a déposé la silice sur les parois du tube et du bassin. Mais ce n'est pas ce qui a eu lieu; l'eau ne forme aucun dépôt; on peut la garder aussi longtemps qu'on voudra sans qu'une substance solide s'en sépare. Mise en bouteille, elle reste des années entières aussi claire que du cristal, sans montrer la plus légère tendance à former un précipité. Dans cette manière de résoudre la question posée, il faudrait admettre en outre que le puits a été formé par une action étrangère, et que l'eau l'a simplement revêtu à l'intérieur. Mais le bassin du Geyser est situé au som-

met d'un tertre, d'environ 12 mètres de hauteur, et il est évident, à la simple inspection des lieux, que le tertre a été formé par le Geyser; donc en construisant le tertre, la source a aussi formé le tube qui le traverse de part en part; de là cette conclusion que le Geyser est l'architecte de son propre tube.

Si nous plaçons une certaine quantité d'eau du Geyser dans un bassin d'évaporation, voici ce qui arrive : au centre du bassin le liquide ne dépose rien, mais sur les côtés où il est attiré par l'attraction capillaire, et soumis ainsi à une évaporation rapide, nous trouvons un dépôt de silice. Un anneau de silice se forme tout à l'entour du bord; et il faudrait que l'évaporation de l'eau se continuât pendant bien longtemps pour qu'on pût apercevoir un léger trouble au centre du bassin. Cette expérience est la représentation microscopique de ce qui se passe en Islande. Imaginez le cas d'une simple source siliceuse thermale, dont l'eau s'écoule goutte à goutte sur une pente douce : l'eau ainsi étalée s'évapore rapidement et de la silice est déposée. Ce dépôt élève graduellement le flanc sur lequel l'eau coule, lui donne du relief, et force enfin l'eau à prendre un autre cours. La même chose a eu lieu ici : le sol s'est élevé peu à peu, comme il vient d'être dit; la source a dû sans cesse tourner et monter, déposant sa silice, et rendant plus profond le puits qu'elle habite, jusqu'à ce qu'enfin, dans le cours des âges, la simple source ait créé le merveilleux appareil qui a si longtemps embarrassé et étonné le voyageur et le savant.

Avant une éruption, le tube et le bassin se sont remplis d'eau chaude; des détonations qui ébranlent le sol se font entendre par intervalles, et chacune d'elles est suivie d'une violente agitation dans le bassin. L'eau est soulevée dans le tuyau de manière à former un monticule au centre du bassin; il en résulte un trop-plein qui se déverse. Ces détonations sont dues évidemment à la production de vapeur dans les conduits qui alimentent le tube du Geyser; cette vapeur, se mêlant à l'eau plus froide du tube, y est soudainement condensée, et produit les explosions. M. le professeur Bunsen a réussi à déterminer la température du tube du Geyser, depuis le sommet jusqu'au fond, quelques minutes

avant une grande éruption ; et ses observations ont révélé le fait extraordinaire que sur aucune partie du tube l'eau n'atteignait le point d'ébullition. Dans le dessin ci-joint (fig. 36),

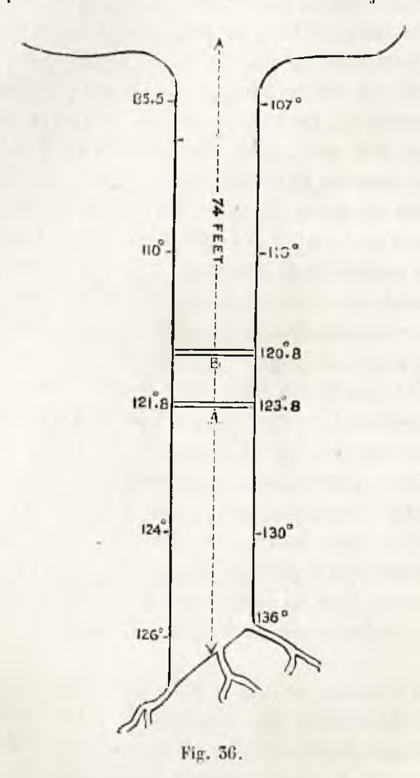


Fig. 36.

j'ai indiqué, à gauche, les températures réellement observées, et à droite, les températures d'ébullition calculées en tenant compte tout à la fois de la pression de l'atmosphère et de la pression de la colonne d'eau superposée. La portion du tube où l'eau est la plus voisine de son point d'ébullition est en A, à 9 mètres du fond ; et là même, l'eau est à 2° centigrades, au-dessous de la température à laquelle elle peut bouillir. Com-

ment donc une éruption peut-elle arriver dans de telles circonstances ?

Fixez votre attention sur l'eau à ce point A, où la température est à 2 degrés au-dessous du point d'ébullition. Rappelez à votre esprit le soulèvement de la colonne au moment où la détonation a été entendue. Admettons que l'arrivée de la vapeur par les conduits du fond du tube ait soulevé la colonne du Geyser de 2 mètres, hauteur tout à fait comprise entre les limites de l'observation réelle, ce soulèvement amène l'eau de A en B. Son point d'ébullition en A était 123,8°, et sa température actuelle est de 121,8°, mais en B, la température d'ébullition est seulement de 120,8°; d'où il suit que, dans le transport de A en B, la chaleur possédée par l'eau est supérieure à celle qui est nécessaire pour la faire bouillir. Cet excès de chaleur sert instantanément à engendrer de la vapeur; la colonne est de nouveau soulevée, et l'eau inférieure est déchargée d'une partie de sa pression; il se forme plus de vapeurs ; depuis le milieu du tube jusqu'en bas, la masse entre soudainement en ébullition, l'eau qui est au-dessus, mêlée à des nuages de vapeur, est projetée dans l'atmosphère, et nous avons l'éruption du Geyser dans toute sa grandeur.

Par son contact avec l'air, l'eau est refroidie; elle retombe dans le bassin, remplit partiellement le tube, dans lequel elle s'élève graduellement, et finit par remplir le bassin comme auparavant. Quelques détonations surviennent encore dans le bassin. Ce sont autant de vaines tentatives d'éruption ; ce sera seulement quand l'eau dans le tube aura atteint une température assez rapprochée de l'ébullition pour pouvoir soulever effectivement la colonne d'eau, que nous aurons de nouveau une véritable éruption.

Nous devons cette belle théorie à M. Bunsen. Essayons maintenant de la justifier par une expérience. Voici un tube de fer galvanisé, long de 2 mètres (fig. 57), et surmonté d'un bassin CD. Il est chauffé en dessous par du feu; et pour le placer autant que possible dans la condition du Geyser, j'ai entouré le tube d'un second foyer F, à la hauteur de 60 centimètres au-dessus du fond. Sans doute que la haute température de

Fig. 37.

l'eau au point correspondant du tube du Geyser est due à l'action locale des roches très-chaudes. Je remplis le tube avec de l'eau qui s'échauffe graduellement, régulièrement, et, toutes les cinq minutes, l'eau s'élance du tube dans l'atmosphère.

Il est en Islande une autre source fameuse, appelée le Strokkur, que l'on force habituellement à faire explosion en fermant l'orifice avec des mottes de terre. Nous pouvons donner une idée de ce mode d'action en fermant l'ouverture de notre tube A B avec un bouchon. Je le fais, et l'eau va s'échauffer progressivement. La vapeur inférieure finira par atteindre une tension assez grande pour lancer le bouchon, et l'eau, soudainement soulagée de la pression, s'élancera dans l'atmosphère. La voilà qui part! Le plafond de cette salle est élevé de près de 10 mètres au-dessus du plancher, et cependant l'éruption a atteint le plafond, d'où l'eau retombe maintenant en gouttes très-abondantes. Je donne dans la fig. 58 une section du Strokkur.

Fig. 58.

En fermant le tube principal avec des bouchons, que traversent d'autres tubes de longueur et de largeur diverses, on peut arriver à imiter exactement le jeu de plusieurs autres sources éruptives. Ici, par exemple, j'ai réalisé une action intermittente; des flots d'eau et de vapeur impétueuse se succèdent très-rapidement les uns aux autres; vous voyez l'eau s'élancer en jets de 5 à 6 mètres de hauteur. Il est donc prouvé expérimentalement que le tube du Geyser est lui-même la cause suffisante de ses éruptions, et nous voici dispensés de recourir à des cavernes souterraines remplies d'eau et de vapeur, autrefois regardées comme absolument nécessaires à la production de ces phénomènes mystérieux.

Il suffit d'un moment de réflexion pour comprendre qu'il doit

y avoir une limite aux opérations du Geyser. Lorsque le tube a atteint une longueur telle que l'eau, dans ses profondeurs inférieures, ne peut plus atteindre son point d'ébullition, en raison de l'accroissement de pression, les éruptions cessent nécessairement. La source, néanmoins, continue de déposer sa silice, et souvent forme un *laug* ou citerne. Quelques-uns de ces laugs d'Islande ont 12 mètres de profondeur. Leur beauté, d'après M. Bunsen, est indescriptible : une vapeur légère ondule à leur surface, l'eau est du plus pur azur, et teinte de ses nuances délicieuses les inscrustations fantastiques des parois de la citerne; tandis qu'au fond, on aperçoit souvent la bouche d'un Geyser autrefois très-puissant. On trouve en abondance en Islande des traces d'opération de Geysers, autrefois grandioses, aujourd'hui éteints. On voit des tertres dont les puits sont remplis de décombres, parce que l'eau, se frayant de force un passage, s'en échappe en dessous pour aller porter ailleurs le théâtre de son action. Le Geyser, en un mot, se montre à nous dans toutes les phases de son existence, sa jeunesse, son âge mûr, sa vieillesse et sa mort. Dans sa jeunesse, simple source thermale; dans son âge mûr, colonne éruptive; dans sa vieillesse, *laug* tranquille; sa mort enfin est comme enregistrée par le puits en ruine et le tertre qui témoignent de son activité d'autrefois.

APPENDICE A LA LEÇON IV

EXTRAIT D'UNE LEÇON SUR LES VIBRATIONS ET LES SONS PRODUITS PAR LE CONTACT DE CORPS A DES TEMPÉRATURES DIFFÉRENTES

(Donnée à l'Institution royale, le vendredi 27 janvier 1854.)

Dans l'année 1805, M. Schwartz, inspecteur d'une des fonderies de la Saxe, plaça sur une enclume froide une masse chaude d'argent en forme de coupe, et fut surpris d'entendre des sons musicaux s'échapper de cette masse pendant son refroidissement. Dans l'automne de cette même année, M. le professeur Gilbert de Berlin visita les travaux de la fonderie, et répéta l'expérience. Il observa que les sons étaient accompagnés d'un tremblement de l'argent chaud, et que lorsque les vibrations cessaient, le son cessait aussi. M. le professeur Gilbert enregistra simplement les faits, sans même essayer de les expliquer.

Dans l'année 1829, M. Arthur Trevelyan, occupé à étendre de la résine avec un fer à souder chaud, et venant à remarquer que le fer était trop chaud pour son dessein, l'appuya obliquement contre un bloc de plomb qui se trouvait par hasard sous sa main ; bientôt une note aiguë, qu'il compara à celle d'un galoubet du Northumberland, sortit de la masse de fer, et en regardant celle-ci de plus près, il constata qu'elle était animée d'un mouvement vibratoire sensible. M. le docteur Reid d'Edimbourg l'engagea à poursuivre l'étude de ce phénomène, et les résultats de ses nombreuses expériences furent imprimés plus tard dans les *Transactions* de la Société royale d'Edimbourg.

Le 1er avril 1831, ces sons et ces vibrations singulières formèrent le sujet d'une des conférences solennelles faites le vendredi soir à l'Institution royale. M. le professeur Faraday exposa et appuya de nouveaux arguments l'explication donnée par M. Trevelyan et sir John Leslie. Il les attribua aux pulsations de la masse chaude contre la

masse froide placée au-dessous, ces pulsations étant, dans beaucoup de cas, suffisamment rapides pour produire une note musicale élevée. L'expansion et la contraction alternatives de la masse froide aux points où le berceau vient à la toucher étaient regardées par lui comme la cause de l'entretien des vibrations. Et il expliquait la supériorité bien constatée du plomb par sa dilatabilité plus grande unie à sa conductibilité plus faible : la conductibilité faible ayant pour effet d'empêcher la chaleur de se dissiper trop rapidement.

M. le professeur J. D. Forbes, d'Édimbourg, était présent à cette leçon, et ne se sentant pas satisfait de l'explication donnée par M. Faraday, il se promit de faire de ces phénomènes, l'objet d'un examen spécial. Les résultats de son examen sont énoncés dans un mémoire très-ingénieux communiqué par lui en 1833 à la Société royale d'Édimbourg. Il rejette l'explication soutenue par M. le professeur Faraday, et attribue les vibrations à une *nouvelle espèce d'action mécanique de la chaleur*, à une répulsion exercée par la chaleur elle-même, quand elle passe d'un bon conducteur dans un mauvais. Cette conclusion s'appuie sur un certain nombre de lois générales établies par M. le professeur Forbes. Si ces lois étaient vraies, un grand pas aurait été réellement fait dans la connaissance de la nature intime de la chaleur elle-même, et cette considération a été pour M. Tyndall le motif déterminant des nouvelles recherches qu'il a cru devoir faire dans cette direction.

Il avait commencé ses expériences, lorsqu'il apprit de M. le professeur Magnus de Berlin, que le sujet avait été traité très à fond par Seebeck. En lisant le mémoire intéressant de Seebeck, M. Tyndall trouva que plusieurs des résultats qu'il voulait mettre en évidence avaient été déjà obtenus. Mais la portion du sujet restée intacte était encore d'un intérêt suffisant pour l'engager à suivre sa résolution première.

Les lois générales du professeur Forbes furent alors soumises successivement au contrôle de l'expérience. La première affirmait que *les vibrations n'ont jamais lieu entre des substances de même nature.* M. Tyndall a trouvé qu'il en était généralement ainsi, quand le berceau chaud reposait sur un bloc, ou sur le bord épais d'une plaque de même métal ; mais qu'il en était autrement lorsqu'on employait une plaque mince. Ainsi, un berceau de cuivre posé sur la tranche d'une pièce d'un penny ne vibre pas d'une manière permanente ; mais si on martèle la pièce de manière à lui donner un bord aigu, les vibrations se produisent constamment. Un berceau en argent posé sur la tranche d'une demi-couronne aussi en argent refuse de vibrer d'une manière permanente, tandis que sur la tranche d'un six-pences il vibre d'une ma-

mière constante. Un berceau en fer posé sur le tranchant d'un couteau de table donne aussi des vibrations continues. Un berceau plat de cuivre dressé sur les pointes de deux plumes ordinaires en cuivre, et ayant son manche convenablement appuyé, donne des vibrations distinctes. Dans ces expériences les lames et les plumes étaient fixées dans un étau, et l'on a trouvé que plus la plaque était mince, dans les limites toutefois de sa rigidité, plus l'effet était certain et frappant. On a donc réussi à faire vibrer du fer sur du fer, du cuivre sur du cuivre, du laiton sur du laiton, du zinc sur du zinc, de l'argent enfin, sur de l'argent. Cette liste pourrait encore être augmentée ; mais les cas cités sont suffisants pour que la proposition ci-dessus énoncée ne puisse pas être considérée comme exprimant « une loi générale. »

La seconde loi générale énoncée par le professeur Forbes est que « *les deux substances du berceau et du support doivent être métalliques.* » C'est la loi qui d'abord attira l'attention de M. Tyndall. Durant le cours de recherches, ayant avec celles de M. Forbes quelque affinité, il avait découvert que certains corps non métalliques, sont doués d'un pouvoir conducteur bien supérieur à celui qu'on leur avait supposé jusque-là, et la pensée lui vint que de semblables corps, convenablement employés, pouvaient tenir la place des métaux dans la production des vibrations. Cette prévision se réalisa. Des berceaux d'argent, de cuivre, de laiton, placés sur l'arête naturelle d'un prisme de cristal de roche, donnèrent des sons distincts ; sur l'arête très-unie d'un cube de spath fluor, les sons furent encore plus musicaux ; sur une masse de sel gemme, les vibrations furent très-intenses. Il est à peine une substance, métallique ou non métallique, sur laquelle les vibrations puissent être obtenues plus facilement et plus certainement que sur le sel gemme. Dans la plupart des cas une haute température est nécessaire à la production des sons, mais dans le cas du sel gemme, la température n'a pas besoin d'excéder celle du sang. Cette substance déjà si remarquable, se montrait ainsi douée d'une propriété nouvelle et singulière. Il serait inutile d'énumérer plus complétement les minéraux soumis à l'expérience. Plus de vingt substances non métalliques furent tour à tour essayées par M. Tyndall ; et avec chacune d'elles, il obtint des vibrations très-nettes.

Le nombre des exceptions à la loi dépasse de beaucoup celui des substances mentionnées dans le mémoire du professeur Forbes ; et elles suffisent surabondamment à montrer que cette seconde loi est à son tour insoutenable.

La troisième loi générale veut « *que les vibrations aient lieu*

avec une intensité proportionnelle, entre certaines limites, *à la différence de conductibilité des métaux pour la chaleur, le métal de moindre conductibilité étant nécessairement le plus froid.* » Les arguments invoqués contre la première loi semblaient aussi renverser la troisième; car si l'intensité des vibrations était proportionnelle à la différence des pouvoirs conducteurs, il ne devrait pas y avoir de vibrations là où la différence de conductibilité n'existe plus. Or, il a été prouvé, dans une demi-douzaine de cas, que des vibrations se produisent entre des morceaux de même métal. La condition formulée par M. Forbes n'en a pas moins été combattue directement. L'argent figure en tête des corps conducteurs; on a fixé dans un étau une lame de ce métal, et des berceaux chauds de laiton, de cuivre et de fer ont été successivement dressés sur sa tranche; tous ont donné des vibrations distinctes. On a encore obtenu des vibrations avec un berceau en lait onposé sur le bord d'un demi-souverain. Ces expériences et beaucoup d'autres, prouvent invinciblement qu'il n'est pas nécessaire que le plus mauvais conducteur soit le métal froid, comme l'affirmait la troisième loi générale de M. Forbes. Parmi les métaux, l'antimoine et le bismuth, que M. Forbes avait trouvés complétement inertes, on donné à M. Tyndal des sons musicaux.

M. le professeur Faraday, ainsi qu'il a été dit, attribuait la supériorité du plomb employé comme bloc froid à sa grande dilatabilité, unie à l'insuffisance de sa conductibilité. A cette assertion, qu'il regardait comme une méprise évidente, M. Forbes opposait une argumentation ingénieuse, et en apparence irréfutable. Les vibrations, disait-il, dépendent de la différence de température entre le berceau et le bloc; si le dernier est un mauvais conducteur et retient la température à sa surface, il tend par là même à amener les deux surfaces en contact à la même température, et par conséquent à éteindre les vibrations, au lieu de les exalter. En outre, plus est grande la quantité de chaleur transmise du berceau au bloc durant le contact, plus grande aussi sera la dilatation; d'où il suit que, si les vibrations sont dues à cette cause, elles seront nécessairement au maximum, lorsque le bloc sera le meilleur conducteur possible. Mais M. le professeur Forbes, dans son argumentation, semble avoir pris le terme d'expansion dans deux sens différents. L'expansion qui produit la vibration est le soulèvement soudain du point où le berceau chaud arrive en contact avec la masse froide qui le porte; tandis que l'expansion due à la bonne conductibilité doit être une dilatation générale de la masse. Imaginez que la conductibilité du bloc soit infinie, c'est-à-dire que la chaleur communi-

quée par le berceau se diffuse instantanément dans le bloc tout entier ; alors, quoique la dilatation générale puisse être très-grande, la dilatation locale au point de contact devra manquer, et les vibrations ne seront pas possibles. La conséquence inévitable d'une bonne conductibilité est une soustraction soudaine de la chaleur du point de contact du berceau avec la substance qui le porte ; et M. Tyndall avait vu précisément dans cette conséquence, la raison pour laquelle M. le professeur Forbes n'obtenait pas de vibrations, lorsque le métal froid était un bon conducteur. Il faisait usage de blocs massifs, et la soustraction de la chaleur du point de contact par la masse métallique circumjacente, était si soudaine, qu'elle empêchait le soulèvement dont les vibrations dépendent essentiellement. Dans les expériences de M. Tyndall, cette soustraction était considérablement amoindrie par la réduction des masses métalliques à l'état de lames minces ; et de cette manière, les expériences mêmes par lesquelles M. le professeur Forbes voulait renverser la théorie de M. le professeur Faraday, deviennent, lorsqu'on les approfondit mieux, des preuves convaincantes de la justesse des vues de l'illustre physicien que nous venons de nommer.

EXTRAIT D'UN MÉMOIRE SUR QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA GLACE [1]

Dans un mémoire très-intéressant communiqué à l'Association britannique dans sa dernière réunion, M. James Thomson a expliqué de la manière suivante, comment deux morceaux de glace à 0° se soudent ensemble par la congélation : « Les deux morceaux de glace, étant pressés l'un contre l'autre à leur point de contact, seront en ce point, par suite de la pression, liquéfiées en partie avec abaissement de température ; et le froid résultant de leur liquéfaction, déterminera la congélation, au moins partielle, de la couche liquide interposée entre les deux morceaux.

Je suis loin de nier l'efficacité, dans des circonstances propices, de la *vera causa*, à laquelle M. Thomson fait allusion, mais je ne pense pas qu'elle explique réellement les faits : car la regélation a lieu sans l'intervention de la pression nécessaire pour faire entrer en jeu, d'une manière sensible, l'effet dont M. Thomson a besoin.

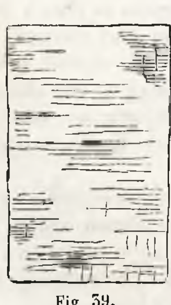
Il n'est pas nécessaire de presser les morceaux de glace ensemble ; si

[1] *Phil. Trans.*, 1858, p. 225.

l'un est simplement posé sur l'autre, ils se souderont encore. D'autres substances que la glace sont susceptibles de se souder à elle. Si on enroule un linge autour d'un morceau de glace à 0°, le linge et la glace feront corps ensemble. La flanelle réussit mieux encore; un morceau de flanelle enroulé autour d'un morceau de glace, se soude à lui quelquefois si fortement, qu'il faut la déchirer violemment pour l'en séparer. Le coton, la laine, les cheveux, se prennent aussi à la glace, sans l'intervention d'une pression quelconque nécessaire à rendre sensiblement active la cause assignée par M. Thomson.

Mais il est une classe de phénomènes à l'explication desquels l'abaissement du point de congélation de l'eau, par la pression, peut, je pense, être très-proprement appliqué. Les faits suivants ressortent de cinquante expériences et plus, faites avec de la glace prise dans différents lieux. Un cylindre de glace, haut de 5 centimètres, de 2 centimètres et demi de diamètre, a été placé entre deux plaques de buis, et soumis à une pression graduellement croissante. En le regardant perpendiculairement à sa longueur, on voyait des raies obscures se dessiner en travers du cylindre: et lorsqu'on regardait le cylindre obliquement, on reconnaissait dans ces raies les surfaces de séparation troubles ou nuageuses de sections planes qui le traversaient, et lui donnaient une apparence exactement semblable à celle d'un cristal de gypse (fer de lance) dont les plans de clivage ont été séparés ou mis hors de contact optique par quelque force externe.

La figure 39 représente le cylindre vu perpendiculairement à son axe, et la figure 40 montre le même cylindre vu obliquement.



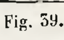


Fig. 39.



Fig. 40.

Pour s'assurer si la rupture du contact optique révélée par ces expériences était due à l'introduction de l'air entre deux surfaces de

glace distinctes, on mit un cylindre de glace de 5 centimètres de longueur, de 2 centimètres et demi de largeur, dans un vase en cuivre contenant de l'eau à la température de 0°. Le cylindre de glace s'élevait d'un centimètre au-dessus de la surface de l'eau. Le vase de cuivre étant placé sur une plaque de bois, et une seconde plaque de bois posée sur le cylindre de glace, le tout fut soumis à la pression. Lorsque les surfaces nuageuses se furent montrées dans la portion de glace au-dessus de l'eau, on retira le cylindre et on l'examina. Les plans de rupture sillonnaient toute la longueur du cylindre, exactement comme s'il avait été comprimé dans l'air libre.

L'intrusion de l'air dans les fissures pouvait aussi avoir lieu pendant qu'on retirait le cylindre du vase. Je pris donc un troisième cylindre de glace, long de 5 centimètres, haut de 2 centimètres et demi, et je le plaçai dans un fort vase de verre, rempli d'eau à la température de 0°. En comprimant le tout, comme dans la dernière expérience, je vis les surfaces de discontinuité se former au sein du liquide tout aussi distinctement que dans l'air.

Ces surfaces sont dues à la compression et non à quelque déchirement de la masse produit par traction, et elles sont le mieux développées là où la pression, sans sortir des limites qui détermineraient la rupture, est un maximum. Un morceau cylindrique de glace dont une des faces extrêmes n'était pas parallèle à l'autre, fut placé entre des plaques de bois et soumis à la pression. La figure 41 montre la disposition de l'expérience. L'effet sur le cylindre de glace est indiqué par la figure 42; les surfaces de clivage apparaissent le long du côté qui a supporté la pression.

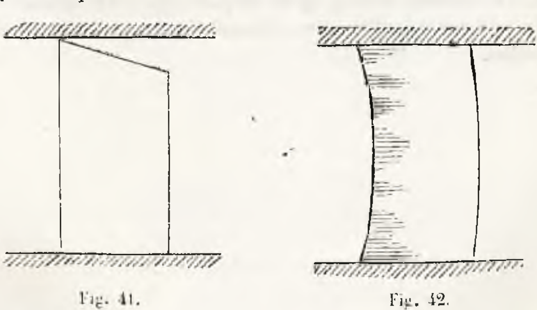


Fig. 41. Fig. 42.

Quelquefois, les surfaces commencent au centre du cylindre. On voit d'abord une petite tache obscure qui, à mesure que la pression con-

tinue, s'étend jusqu'à ce qu'elle embrasse la section transversale entière du cylindre.

En examinant ces surfaces avec une loupe, elles m'ont paru formées de très-minces gouttelettes d'eau, comme celles qui se déposent sur une surface polie et froide, sur laquelle on projette son haleine. Si elles étaient des plaques vides, ou des plaques pleines d'air, leur projection optique aurait été bien plus lumineuse qu'elle ne l'était réellement.

Un miroir concave fut disposé de telle sorte que la lumière diffuse du jour tombât en plein sur le cylindre pendant qu'il était sous pression. Lorsqu'on observait à travers une lentille les surfaces en voie d'expansion, elles se montraient dans un état de mouvement intense, dû probablement aux tensions moléculaires des petites goutelettes d'eau. Ce mouvement suivait de près le bord de la surface, à mesure qu'il se propageait à travers le solide. Une ou deux fois, j'ai remarqué que les surfaces étaient reliées à la masse par des jets obscurs qui paraissaient liquides. Elles constituaient une sorte de cristallisation négative ayant la forme exacte des pointes ou aiguilles cristallines produites par la congélation de l'eau sur une surface de verre. J'eus la certitude alors que ces surfaces avaient été produites par la liquéfaction du solide dans des plans perpendiculaires à la direction de la pression.

Les surfaces de clivage se forment avec une très-grande facilité lorsqu'elles sont parallèles aux surfaces de congélation. En prenant beaucoup de soin, j'ai réussi dans quelques cas à obtenir des surfaces de clivage à angle droit avec les plans de congélation, mais cela est difficile et incertain. Partout où les disques déjà décrits étaient observés, les surfaces étaient toujours aisément développées dans les plans des disques.

LEÇON V

(20 FÉVRIER, 1862)

Application de la théorie dynamique à l'explication des phénomènes de chaleur spécifique et de chaleur latente. — Définition de l'énergie potentielle et dynamique. — Energie des forces moléculaires. — Démonstration expérimentale de la chaleur latente. — Équivalents mécaniques des actions de combinaison, de condensation et de congélation dans le cas de l'eau. — Acide carbonique solide. — État sphéroïdal des liquides. — Sphéroïde flottant dans sa propre vapeur. — Congélation de l'eau et du mercure dans un creuset chauffé au rouge.

Toutes les fois que, dans les Alpes, on se met en route pour une expédition difficile, le montagnard expérimenté commence par marcher d'un pas très-lent, afin que lorsque l'heure réelle de l'épreuve sera venue, il se trouve aguerri et non épuisé par le travail accompli. Aujourd'hui, nous tentons une ascension abrupte, et je vous propose de la commencer dans le même esprit de prudence ; non avec la fougue de l'enthousiasme, bientôt éteint par la difficulté du travail, mais avec un cœur patient et résolu, qui ne reculera point quand surgiront les difficultés.

J'ai ici un poids de plomb attaché à une ficelle qui passe sur une poulie fixée au plafond de la salle. Nous savons que la terre et le poids s'attirent mutuellement ; le poids repose maintenant sur la terre, et exerce une certaine pression sur sa surface. Ici la terre et le poids *se touchent l'un l'autre,* leur attraction mutuelle est satisfaite autant que possible, et leur rapprochement mutuel a rendu tout *mouvement impossible.* En tant qu'il s'agit de l'attraction de gravité, la possibilité de produire du mouvement cesse aussitôt que les deux corps qui s'attirent sont en contact actuel.

Je soulève ce poids. Le voici suspendu à 5 mètres au-dessus du plancher, il est tout aussi immobile que lorsqu'il reposait sur le plancher ; mais, en interposant un espace entre le plancher et lui, j'ai entièrement changé la condition de son existence. En l'élevant, je lui ai conféré le pouvoir de produire le mouvement. Il y a maintenant en lui une possibilité d'action qui n'existait pas lorsqu'il reposait sur la terre : *il peut tomber*, et dans sa chute il peut faire tourner une machine ou exécuter un autre travail. Il n'a pas d'énergie tant qu'il pend là, mort et sans mouvement ; mais l'énergie lui est possible ; et nous pouvons très-légitimement employer ce terme *énergie possible*, pour exprimer la puissance de mouvement que le poids possède, mais qu'il n'a pas encore exercée en tombant ; nous pouvons l'appeler aussi « *énergie potentielle* », comme quelques hommes éminents l'ont déjà fait. Cette énergie potentielle dérive dans le cas actuel de la traction de la gravité, traction qui néanmoins ne s'est pas encore exprimée en mouvement. Mais je laisse maintenant aller la ficelle, le poids tombe et atteint la surface de la terre avec une vitesse d'environ 10 mètres par secondes. A chaque instant de sa descente, il était tiré en bas par la gravité, et sa force motrice finale est la somme de toutes ces tractions. Pendant l'acte de la chute, l'énergie du poids est active. On peut l'appeler énergie *actuelle*, par antithèse avec énergie *possible*. On peut aussi l'appeler énergie *dynamique*, par opposition à l'énergie *potentielle*, et nous pouvons donner le nom de *force motrice* à l'énergie avec laquelle le poids descend. Gardons-nous d'être inattentifs, car il faut que nous soyons promptement en état de distinguer entre l'énergie *en réserve* et l'énergie *en action*. Une fois pour toutes, acceptons les termes de M. Rankine, et appelons *potentielle*, l'énergie en réserve ; *actuelle*, l'énergie en action[1]. Si, après cela, j'emploie encore les expressions *énergie possible*, *énergie dynamique*, *force motrice*, vous n'aurez aucune difficulté à attacher une idée exacte à ces expressions. Et

[1] Helmholtz, dans son admirable mémoire sur la conservation de la force, *die Erhaltung der Kraft* (1847), divise toute énergie en *tension* et *force vive* (*Spannkræfte und Lebendige Kræfte*).

n'oublions pas que l'exactitude est ici essentielle. Il ne nous est plus permis de rien tolérer de vague dans nos conceptions.

Notre poids est parti d'une hauteur de 5 mètres; considérons-le après qu'il a parcouru le premier mètre de sa chute. La traction totale, si nous pouvons nous servir de cette expression, à dépenser en lui est alors diminuée de la quantité exercée dans le parcours du premier mètre. A la hauteur de 4 mètres, il a 1 mètre de moins d'énergie potentielle qu'il n'en possédait à la hauteur de 5 mètres; mais à la hauteur de 4 mètres, il a acquis une quantité équivalente d'énergie dynamique ou actuelle, telle que si elle s'exerçait dans une direction inverse, elle élèverait de nouveau le poids à sa hauteur primitive. Donc, lorsque l'énergie potentielle disparaît, l'énergie dynamique entre en jeu. Dans l'univers tout entier, la somme de ces deux énergies est constante.

Il est encore trop tôt pour nous occuper des procédés de la vie organique, mais, si je pouvais découvrir l'état moléculaire de mon bras lorsque je soulève ce poids, je reconnaîtrais que, dans l'exercice de cet acte mécanique, il y a eu consommation ou dépense d'une quantité équivalente d'une autre forme de mouvement. Si le poids avait été soulevé par la chaleur ordinaire, il y aurait eu disparition d'une quantité de chaleur rigoureusement équivalente au travail accompli. Le poids est d'un kilogramme environ, et pour l'élever de 5 mètres, il faudrait dépenser autant de chaleur que pour élever de 1° la température de 36 décimètres cubes d'air. Réciproquement, cette quantité de chaleur serait engendrée par la chute du poids d'une hauteur de 5 mètres. Il est aisé de voir que, si la force de gravité était immensément plus grande qu'elle ne l'est, il faudrait dépenser une quantité de chaleur immensément plus grande pour élever le poids. Plus l'attraction est grande, plus grande sera la quantité de chaleur nécessaire pour la vaincre; mais réciproquement, plus grande sera la quantité de chaleur qu'un corps en tombant développera par son choc contre la terre.

Ayant très-clairement conçu qu'il y a dépense de chaleur quand on charge la chaleur de séparer forcément un corps de la

terre, et que la quantité de chaleur dépensée dépend de l'énergie de la force attractive surmontée, nous devons mettre à profit ces conceptions, relatives jusqu'ici à des masses sensibles, pour les étendre à des masses insensibles. En tant qu'il s'agit d'acte de l'intelligence, il est aussi facile de concevoir la séparation de deux atomes qui s'attirent mutuellement, que de concevoir la séparation de la terre et du poids. J'ai eu déjà l'occasion de parler plus d'une fois de l'énergie des forces moléculaires, et le moment est venu d'y revenir. Étroitement enchaînés comme ils le sont, les atomes des corps, quoique nous ne puissions pas supposer qu'ils soient en contact, exercent des attractions mutuelles énormes. Il faudrait une quantité presque incroyable de force mécanique ordinaire pour élargir les intervalles qui séparent les atomes d'un corps solide ou liquide quelconque, de manière à augmenter son volume dans une proportion considérable. Il faudrait de même une force de très-grande intensité pour rapprocher les particules d'un corps solide ou liquide de telle sorte qu'il occupe un volume moindre. J'ai vainement essayé d'augmenter la densité d'un métal mou par les pressions les plus énergiques. L'eau, par exemple, qui cède si facilement à la main qu'on y plonge, a été regardée longtemps comme absolument incompressible. Elle a été soumise à l'action de grandes forces; mais, plutôt que de se contracter, elle suintait à travers les pores du vase en métal qui la contenait et s'étalait à sa surface sous forme de rosée[1]. En recourant à des moyens compliqués autant

[1] J'ai à remercier mon ami, M. Spedding, de l'extrait suivant, relatif à cette expérience :

« Il est donc certain que des corps plus rares, tels que l'air, admettent un degré de contraction considérable, ainsi qu'il a été établi; tandis que les corps tangibles, tels que l'eau, se contractent beaucoup plus difficilement, et dans une proportion beaucoup moindre. De quelle quantité peuvent-ils se contracter? C'est ce que j'ai cherché dans l'expérience suivante. Je pris un globe creux de plomb capable de tenir environ deux pintes, et suffisamment épais pour supporter une force considérable; ayant fait un trou dans ce globe, je le remplis d'eau et je bouchai le trou avec du plomb fondu, de sorte que le globe redevint tout à fait solide. J'aplatis alors les deux côtés opposés du globe en le frappant avec un lourd marteau; je comprimai l'eau nécessairement, en la forçant d'occuper un

que puissants, nous avons réussi à comprimer l'eau, mais ce n'a été qu'en mettant en jeu des forces très-grandes.

Lorsqu'il s'agit de vaincre les forces moléculaires, il faut les attaquer par leurs paires. La chaleur réalise ce que l'énergie mécanique, telle qu'elle est généralement maniée, est impuissante à exécuter. Les corps se dilatent lorsqu'on les chauffe, et cette dilatation n'a lieu qu'autant que les attractions moléculaires sont vaincues. A masses égales, c'est un travail en comparaison duquel l'érection des pyramides d'Égypte n'est plus qu'un travail de mites; et là où les attractions à vaincre sont énormes, nous pouvons conclure que la quantité de chaleur nécessaire pour les vaincre sera elle-même énorme.

Et maintenant, je réclame votre attention tout entière. Je tiens dans ma main un bloc de plomb; supposez que je lui communique une certaine quantité de chaleur, comment cette chaleur se distribuera-t-elle à l'intérieur de sa substance? Elle a à remplir deux fonctions distinctes ; elle a à exécuter deux sortes de travail. Une

espace moindre, puisque la sphère est la figure de plus grande capacité. Lorsque le marteau ne produisit plus d'effet, à cause de la résistance de l'eau à cette contraction plus forte, je fis usage d'un moulin ou d'une presse, jusqu'à ce que l'eau, impatiente d'être plus longtemps comprimée, suinta à travers le plomb solide sous forme de rosée fine. Je calculai alors la diminution de volume subie par la sphère, et sus ainsi quelle avait été la contraction de l'eau. Mais, pour la faire se contracter de cette faible quantité, quelle violence n'avait-il pas fallu lui faire. » (*Novum Organum*, publié en 1620; traduction de M. Lorquet, page 70, note de R. Leslie Ellis, vol. I, page 324.) — « C'est peut-être la plus remarquable des expériences de Bacon, et il est vraiment singulier qu'il en ait été si peu parlé par les écrivains postérieurs. Près de cinquante ans après l'apparition du *Novum Organum*, Megalotti, secrétaire de l'Académie del Cimento, à Florence, publia le récit d'une expérience toute semblable, devenue célèbre sous le nom d'expérience de Florence. Ce récit commence par ces mots : *Facemmo lavorar*. L'écrivain fait remarquer que l'incompressibilité absolue de l'eau n'était pas prouvée par cette expérience, qu'il en résulte seulement que l'eau ne pouvait pas être comprimée de la manière décrite; mais l'expérience n'est pas concluante par d'autres raisons.

Il y a lieu de rappeler que Leibnitz (*Nouveaux Essais*), en faisant mention de l'expérience de Florence, dit que le globe était d'or (p. 229. Erdmann), tandis que les académiciens florentins disent expressément qu'ils ont préféré l'argent soit à l'or, soit au plomb.

portion de cette chaleur communique l'espèce de mouvement qui élève la température du plomb, et qui est sensible au thermomètre; une autre portion force les atomes du plomb à prendre de nouvelles positions, et cette portion *est perdue en tant que chaleur*. Dans ce cas, la répulsion mutuelle des atomes du plomb, en opposition à leur attraction mutuelle, est exactement l'analogue de l'élévation de notre poids en opposition à la force de la gravité. Essayons de rendre plus étroite la comparaison entre les deux genres d'actions. Supposons que j'ai une quantité définie de force à dépenser sur notre poids, et que je partage cette force en deux portions, dont l'une sert à élever le poids, tandis que l'autre est employée à faire que, pendant qu'il monte, le poids oscille comme un pendule ou tourne comme un régulateur, mais en outre, oscille ou tourne avec une énergie toujours croissante. Nous aurons alors l'analogue de ce qui arrive quand de la chaleur est communiquée au plomb. Les atomes sont éloignés l'un de l'autre, mais pendant qu'ils s'éloignent, ils vibrent ou tournent avec une intensité graduellement croissante. Ainsi la chaleur impartie au plomb se résout: d'une part, en énergie atomique potentielle, et d'autre part en une sorte de musique atomique; cette portion musicale étant seule capable d'agir sur nos thermomètres ou d'affecter nos nerfs.

Dans ce cas, donc, la chaleur accomplit ce que nous pouvons appeler un *travail intérieur* [1]; elle exécute un travail dans l'intérieur du corps chauffé, en forçant ses particules de prendre de nouvelles positions. Lorsque le corps se refroidit, les forces vaincues pendant l'échauffement entrent en jeu, et la chaleur qui avait été dépensée pour séparer de force les atomes est maintenant restituée par leur rapprochement mutuel.

Les chimistes ont déterminé les poids relatifs des atomes de différentes substances. Le poids d'un atome d'hydrogène étant appelé 1, le poids de l'atome d'oxygène, vous le savez, est 16, c'est-à-dire que pour faire un kilog. d'hydrogène, il faut seize fois le

[1] Voyez les excellents mémoires de Clausius dans le *Philosophical Magazine*.

nombre d'atomes contenus dans un kilog. d'oxygène. Le nombre d'atomes requis pour faire un kilog. est évidemment inversement proportionnel au poids atomique. Nous touchons à un point très-délicat et très-important. Les expériences de Dulong et Petit, et celles de MM. Regnault et Neumann, rendent extrêmement probable que tous les atomes élémentaires, grands et petits, pesants et légers, lorsqu'ils sont à la même température, possèdent la même quantité de l'énergie que nous appelons chaleur, les atomes plus légers compensant par leur vitesse ce qui manque à leur masse. Ainsi, chacun des atomes d'hydrogène a la même énergie motrice qu'un atome d'oxygène, à la même température. Mais, de même qu'un kilog. d'hydrogène contient seize fois autant d'atomes, elle doit aussi contenir seize fois la quantité de chaleur possédée par un kilog. d'oxygène, à la même température.

Il en résulte que pour élever la température d'un kilog. d'hydrogène d'un certain nombre de degrés, de 50° ou 60° par exemple, il faudrait seize fois la quantité de chaleur exigée dans les mêmes circonstances par un kilog. d'oxygène. Réciproquement, un kilog. d'hydrogène, en baissant de 10°, devrait abandonner seize fois la quantité de chaleur abandonnée par un kilog. d'oxygène qui baisserait du même nombre de degrés.

Dans l'oxygène et l'hydrogène, nous n'avons pas une quantité sensible de « travail intérieur » à exécuter ; il n'y a pas là d'attractions moléculaires d'une grandeur sensible à vaincre. Mais dans les corps solides et liquides, en outre des différences dues au nombre d'atomes présents dans l'unité de poids, nous avons les différences dues à la chaleur dépensée en travail intérieur. Il est donc clair que les quantités de chaleur contenues dans les différents corps ne sont pas du tout accusées par leur température. Pour élever de 1°, par exemple, la température d'un kilog. d'eau, il faudrait trente fois la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilog. de mercure. Réciproquement, le kilog. d'eau, en baissant d'un degré, abandonnerait trente fois la quantité de chaleur abandonnée par un kilog. de mercure.

Prouvons par une bien simple expérience les différences qui existent entre les corps, quant à la quantité de chaleur qu'ils contiennent. Voici d'une part, un gateau de cire d'abeilles de 15 centimètres de diamètre et de douze millimètres d'épaisseur; de l'autre un vase contenant de l'huile, actuellement à la température de 180°. J'ai plongé dans l'huile chaude des balles de différents métaux, de fer, de plomb, de bismuth, d'étain et de cuivre. Elles ont toutes à présent la même température, à savoir : celle de l'huile. Très bien! Je les tire de l'huile, et je les pose sur ce gâteau de cire C D (fig. 45), qui est porté par la rondelle d'un support de cornue; elles font fondre la cire et s'y enfoncent. Mais je vois qu'elles s'enfoncent avec des vitesses différentes. Le fer et le cuivre s'implantent dans la masse fusible bien plus vigoureusement que les autres métaux; l'étain vient ensuite, mais le plomb et le bismuth restent tout à fait en arrière. Voici que le fer a traversé la cire de part en part, et tombe; le cuivre le suit; je puis voir le fond de la boule d'étain poindre tout juste à la surface inférieure du gâteau, mais il ne peut aller plus loin, tandis que le plomb et le bismuth n'ont fait que bien peu de chemin, incapables qu'ils sont de dépasser la demi-épaisseur du gâteau.

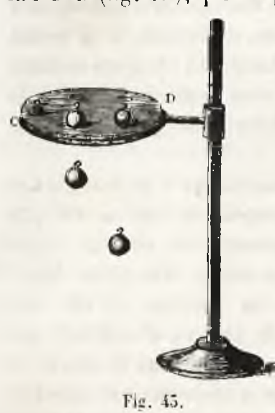


Fig. 45.

Si donc, prenant des poids égaux de différentes substances, je les chauffais toutes à 100°, et déterminais la quantité exacte de chaleur que chacune d'elles cède en se refroidissant de 100° à 0°, je trouverais des quantités de chaleur très-différentes pour les différentes substances. Comment ce problème peut-il être résolu? Des hommes éminents ont essayé de le résoudre en observant le *temps* qu'un corps exige pour se refroidir. Naturellement, plus est grande la quantité de chaleur possédée et engendrée par les atomes, plus les corps exigeront de temps pour se

refroidir. Les quantités relatives de chaleur abandonnées par différents corps ont aussi été déterminées en les plongeant, lorsqu'ils étaient chauds, dans de l'eau froide, et observant le gain d'une part, la perte de l'autre. Le problème a encore été résolu par l'observation des quantités de glace que peuvent liquéfier différents corps, en s'abaissant de 100° à 0°. Ces différentes méthodes ont donné des résultats concordants. Prenant pour unité la quantité de chaleur abandonnée par un kilog. d'eau pendant que la température baisse d'un degré, les nombres suivants expriment la quantité de chaleur abandonnée par un kilog. de chacune des substances dont les noms leurs correspondent :

Eau	1,0000	Fer	0,1138
Soufre	0,2026	Cobalt	0,1070
Arsenic	0,0814	Nickel	0,1086
Antimoine	0,0508	Cuivre	0,0951
Bismuth	0,0308	Mercure	0,0333
Zinc	0,0955	Argent	0,0570
Cadmium	0,0567	Or	0,0324
Étain	0,0562	Platine	0,0324
Plomb	0,0314		

Un coup d'œil jeté sur ce tableau explique pourquoi il s'est fait que, dans le cas du fer et du cuivre, nos balles ont traversé la cire de part en part en la fondant, tandis que le plomb et le bismuth étaient impuissants à les imiter; on constate encore que l'étain occupe ici la position que nous lui aurions assigné d'après l'expérience avec le gâteau de cire; l'eau, on le voit, tient la tête.

Chacun de ces nombres exprime ce que l'on a appelé, jusqu'ici, la *chaleur spécifique*, ou la *capacité pour la chaleur* de la substance à laquelle il correspond. Comme je l'ai établi dans la première leçon, ceux qui soutiennent que la chaleur est un fluide expliquent ces différences en disant que quelques substances ont une plus grande provision de fluide que d'autres. Nous pouvons, sans inconvénient, continuer à nous servir des mots *chaleur spécifique*, ou *capacité pour la chaleur*, maintenant que

nous connaissons la véritable nature des actions qui se cachent sous ces expressions.

L'énergie des forces engagées dans ce mouvement atomique et ce travail intérieur, mesurée à l'échelle des énergies mécaniques ordinaires, est vraiment énorme. J'ai ici un kilogramme de fer qui, chauffé de 0° à 100°, se dilate d'environ $\frac{1}{800}$ du volume qu'il possède à 0°; cette augmentation de volume échapperait certainement aux yeux les plus perçants ; cependant, pour imprimer à ses atomes le mouvement correspondant à cette élévation de température, et pour leur faire franchir le petit espace indiqué par cette fraction si petite, il faudrait toute la quantité de chaleur capable d'élever 5 000 kilogrammes à la hauteur de 1 mètre. La gravité s'évanouit presque en comparaison de ces formes moléculaires ; la traction exercée par la terre sur le poids d'un demi-kilogramme pris en masse n'est rien comparée à l'attraction mutuelle de ses propres molécules. L'eau nous fournit un exemple plus frappant encore. Elle se dilate au-dessous et au-dessus de 4° C. A 4°, elle a son maximum de densité. Concevons un kilogramme d'eau chauffée de 3° $\frac{1}{2}$ à 4° $\frac{1}{2}$, ou devenu plus chaude de 1°. Son volume à ces deux températures est le même ; il n'y a eu aucune tendance à la séparation forcée des centres atomiques ; et cependant, quoique le volume ne soit pas changé, on a communiqué à l'eau une quantité de chaleur suffisante, si elle était appliquée mécaniquement, pour élever un poids de 424 kilogrammes à la hauteur de 1 mètre. Le travail intérieur exécuté dans ce cas par la chaleur ne peut avoir été que de faire tourner sur eux-mêmes les atomes de l'eau. Par un mouvement tangentiel elle a séparé les pôles par lesquels les atomes s'attirent, mais en laissant leurs centres atomiques à la même distance au commencement et à la fin. Les considérations auxquelles je me livre ne sont pas d'un abord facile pour ceux qui ne sont pas familiarisés avec ce genre d'étude ; mais elles finiront par devenir très-claires pour ceux qui auront la patience de s'y arrêter assez longtemps.

C'est ici le lieu de noter encore qu'il y a d'autres genres de tra-

vail intérieur que celui qui consiste à porter les atomes à de plus grandes distances les uns aux autres. Il se peut qu'un travail intérieur énorme soit accompli quand les atomes, au lieu de se repousser, par une impulsion commune, s'approchent les uns des autres. Ce sont ces forces polaires, ces forces émanant de centres déterminés et agissant dans des conditions aussi déterminées, qui donnent aux cristaux leur symétrie ; et le triomphe remporté sur ces forces, en même temps qu'il exige une dépense de chaleur, peut être accompagné d'un diminution de volume. C'est ce qui est démontré par la manière dont l'eau et le bismuth se comportent en se liquéfiant. Je pourrais aisément assigner des groupements d'atomes pouvant satisfaire pleinement à toutes les exigences de ces états divers. Mais je laisse à chaque esprit cultivé à imaginer lui-même de semblables combinaisons.

La haute chaleur spécifique de l'eau peut être considérée à un autre point de vue, que je ne veux pas omettre. *A poids égaux*, la chaleur spécifique de l'eau étant 1, celle de l'air est environ 0,25. Il en résulte qu'un kilog. d'eau, en perdant 1° de température, élèverait de 1° la température de 4 kilog. d'air. Mais l'eau est 770 fois plus pesante que l'air ; donc, comparant des volumes égaux, un mètre cube d'eau, en perdant 1° de température, éleverait de 1° la température de 770×4 ou 3 080 mètres cubes d'air.

La grande influence que l'Océan doit exercer comme modérateur du climat se présente ici d'elle-même. La chaleur de l'été est emmagasinée dans l'Océan, et lentement abandonnée pendant l'hiver. C'est là une cause d'absence d'extrêmes de température dans le climat des îles. Les étés des îles ne peuvent jamais atteindre la chaleur brûlante de l'été des continents, et l'hiver des îles ne peut jamais être aussi rigoureux que l'hiver des continents. Sur divers points du continent on cueille des fruits que nos étés ne peuvent pas mûrir ; mais aussi, là nos arbres toujours verts sont inconnus, ils ne peuvent pas y vivre pendant les hivers. L'hiver de l'Islande est, en règle générale, plus doux que l'hiver de la Lombardie,

Nous avons jusqu'ici concentré notre attention sur la chaleur

dépensée dans les changements moléculaires des corps solides et liquides, pendant que ces corps continuent d'être à l'état solide ou liquide. Nous dirigerons maintenant notre attention sur les phénomènes qui accompagnent les *changements d'état d'agrégation*. Lorsqu'il est suffisamment chauffé, un solide fond, et lorsqu'il est suffisamment chauffé, un liquide prend la forme de gaz. Considérons en particulier la glace et suivons-la dans toutes ses phases. Ce bloc de glace est maintenant à la température de —6°. Je le chauffe ; un thermomètre en contact avec lui s'élève à 0°, et à ce point la glace commence à se fondre ; la colonne thermométrique, qui montait d'abord, est maintenant arrêtée dans sa marche, et devient complétement stationnaire. Je continue d'appliquer de la chaleur, mais il n'y a plus d'élévation de température ; et le thermomètre ne reprendra sa marche ascendante que lorsque toute la glace solide sera devenue liquide. Le thermomètre monte de nouveau ; il atteint 100° ; voici que des bulles de vapeur se montrent dans le liquide ; il bout, et à partir de ce point le thermomètre demeure stationnaire à 100°.

Mais pourtant, durant la fonte de la glace, comme pendant l'évaporation de l'eau, de la chaleur est nécessairement communiquée : pour liquéfier simplement la glace, il faut lui faire absorber autant de chaleur que pour élever de 79° C. la température du même poids d'eau, ou pour élever de 1° C. la température de 79 fois ce poids d'eau. De même, pour convertir une livre d'eau à 100° en un kilog. de vapeur à la même température il faut 537 fois autant de chaleur que pour élever de 1° la température d'un kilog. d'eau. Le premier nombre, 79°, représente ce qu'on a appelé jusqu'ici la *chaleur latente* de l'eau ; et le second nombre, 537°, représente la chaleur latente de la vapeur. Il était évident pour ceux qui d'abord ont employé ces termes que pendant tout le temps de la fusion, comme pendant tout le temps de l'ébullition, de la chaleur était communiquée ; mais comme cette chaleur n'était pas révélée par le thermomètre, on inventa cette notion qu'elle était rendue latente. Dans notre théorie actuelle, la chaleur communiquée pendant la fusion est dépensée à conférer aux atomes une énergie potentielle. C'est, virtuellement, le

soulèvement d'un poids. De même, en ce qui regarde la vapeur, la chaleur fournie est dépensée à éloigner de force les unes des autres les molécules liquides, et à leur conférer une plus grande somme d'énergie potentielle ; lorsque la chaleur est soustraite, la vapeur se condense, les molécules se choquent de nouveau avec une énergie dynamique égale à celle qui avait été employée à les séparer, et toute la quantité de chaleur consommée alors reparaît maintenant de nouveau.

L'acte de la liquéfaction consiste en travail intérieur, travail dépensé à amener les atomes dans de nouvelles positions. L'acte de la vaporisation est aussi, pour la plus grande partie, du travail intérieur ; auquel néanmoins doit être ajouté le travail extérieur exécuté dans l'acte de l'expansion de la vapeur, qui se fait place en refoulant l'atmosphère.

Nous sommes redevables à l'homme éminent, que j'ai si souvent cité, de la première détermination exacte du pouvoir calorifique du combustible. « Rumford estima le pouvoir calorifique d'un corps par le nombre de parties d'eau, en poids, dont une partie en poids du corps peut élever d'un degré la température par sa combustion parfaite. Ainsi, une partie de houille, en poids, en se combinant avec $2\frac{2}{3}$ parties d'oxygène pour former de l'acide carbonique, développerait assez de chaleur pour élever de 1° C. la température d'environ 8000 parties en poids d'eau. De même, un kilogramme d'hydrogène, en se combinant avec huit kilogrammes d'oxygène pour former de l'eau, élèverait de 1° C. la température de 34 000 kilogrammes d'eau. Les pouvoirs calorifiques relatifs du carbone et de l'hydrogène sont, par conséquent, comme 8 : 34[1]. » Les recherches plus récentes et plus délicates de MM. Favre et Silbermann confirment entièrement les déterminations de Rumford.

Arrêtons maintenant notre attention sur cette merveilleuse substance, l'eau, et suivons-la à travers les phases diverses de son existence. Nous sommes d'abord en présence de principes constituants à l'état d'atomes libres, qui s'attirent, tombent l'un

[1] Percy's *Metallurgy*, p. 53.

sur l'autre et se choquent. La valeur mécanique de cette action atomique est facile à déterminer. Connaissant le nombre de kilogrammètres correspondant à l'élévation de température de 1° d'un kilogramme d'eau, nous pouvons calculer aisément le nombre de kilogrammètres équivalent à l'élévation de température de 1° c. de 34 000 kilogrammes d'eau. Multipliant ce dernier nombre par 424, nous trouvons que la collision de notre kilogramme d'hydrogène, avec nos huit kilogrammes d'oxygène équivaut mécaniquement à l'élévation de 14 416 000 kilogrammes à un mètre de hauteur ! Vous voyez d'après cela, que je n'ai rien exagéré quand j'ai dit que la force de gravité telle qu'elle s'exerce à la surface de la terre s'évanouit presque quand on la compare aux forces moléculaires ! Et songez aux distances qui séparent les atomes avant leur combinaison, distances si petites qu'il est tout à fait impossible de les mesurer. C'est pourtant en parcourant ces distances infiniment petites que les atomes acquièrent une vitesse assez grande pour qu'ils s'entre-choquent avec l'épouvantable énergie exprimée par les nombres qui précèdent.

Après la combinaison, la substance formée se trouve à l'état de vapeur qui s'abaisse à 100°, et se condense ensuite en eau. Dans le premier cas, les atomes s'abattent les uns sur les autres pour former le composé; dans le second cas, les molécules s'abattent les unes sur les autres pour former un liquide. La valeur mécanique de ce second acte est encore aisée à calculer ; 9 kilogr. de vapeur en se condensant en eau, engendrent une quantité de chaleur suffisante pour élever de 1° C. la température de $537 \times 9 = 4\,833$ kilogr. d'eau. Multipliant ce nombre par 424, nous avons 2 049 192 kilogrammètres pour la valeur mécanique du simple acte de la condensation[1]. La grande chute suivante de nos 9 kilogr. d'eau est de l'état liquide à l'état solide ou glacé, et la valeur mécanique de cet acte est de 303 000 kilogrammètres.

[1] Dans les expériences de Rumford, la chaleur de condensation était comprise dans son estimation du pouvoir calorifique; déduisant le nombre ci-dessus du nombre trouvé pour l'union chimique de l'hydrogène et de l'oxygène, il restera encore douze millions de kilogrammètres pour la valeur mécanique de l'acte de combinaison.

Ainsi nos 9 kilogr. d'eau, dans leur origine et leur progrès, tombent successivement dans trois grands précipices; la première chute est équivalente à la descente du poids d'une tonne entraînée par la gravité dans un précipice de 14 416 mètres de hauteur; la seconde chute est égale à celle d'une tonne d'eau tombant dans un précipice de 2 050 mètres de hauteur; la troisième enfin est égale à la chute d'une tonne d'eau tombant dans un précipice de 305 mètres de hauteur. J'ai vu les sauvages avalanches de pierres des Alpes, qui fumaient et tonnaient en descendant les pentes avec une véhémence presque suffisante pour étourdir l'observateur. J'ai vu aussi les flocons de neige descendre si lentement que les fragiles paillettes dont ils sont composés n'en étaient point endommagées; cependant, la production, avec de la vapeur aqueuse, de la quantité de cette tendre matière qu'un enfant pourrait porter, exige le déploiement d'une énergie capable de rassembler les blocs fracassés des plus grandes avalanches de pierres que j'aie jamais vues, et de les lancer à deux fois la hauteur d'où ils sont tombés.

Je tiens maintenant à vous soulager de l'effort que j'ai exercé jusqu'ici sur votre attention en mettant en évidence sous vos yeux, par quelques expériences, les effets calorifiques qui accompagnent le changement d'agrégation des corps. Je fais reposer ma pile thermo-électrique par son dos sur la table, et sur sa face nue je place ce mince bassin d'argent, B (fig. 44), dans

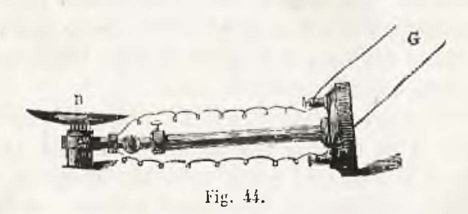


Fig. 44.

lequel je verse une quantité d'eau légèrement chauffée; l'aiguille du galvanomètre marche vers 90°, et s'arrête d'une manière fixe à 70°. Je verse maintenant dans le bassin du nitre en poudre, pas plus que n'en pourrait porter une pièce de cinquante cen-

times. J'ai eu soin d'approcher préalablement le nitre du feu, pour que le liquide ne fût pas seul chaud, et que la poudre solide fût chaude aussi. Observez l'effet du mélange. Le nitre se dissout dans l'eau ; et pour produire ce changement d'état, la chaleur que l'eau et le nitre possèdent ensemble, en excès sur la température de la salle, est toute dépensée ; il en faut même beaucoup plus encore. L'aiguille, vous le voyez, ne revient pas seulement à zéro, elle marche fortement de l'autre côté, montrant ainsi qu'actuellement la face de la pile est puissamment refroidie.

J'ôte le bassin, je verse le liquide, et j'y remets de l'eau chaude, à laquelle j'ajoute une pincée de sel commun. L'aiguille était à 70° lorsque le sel a été introduit ; elle revient maintenant à zéro, et s'éloigne du côté qui indique le froid. Mais l'action est loin d'être aussi énergique que dans le cas du salpêtre. La raison en est que la quantité de travail intérieur exigé par le sel, et qui nécessite une dépense de chaleur, est bien moindre que celle exigée par le nitre. Dans le domaine de la chaleur latente, nous retrouvons donc des différences semblables à celles que nous avons déjà rencontrées quand il s'agissait de la chaleur spécifique. Je vide de nouveau le bassin, j'y verse de l'eau froide, et j'ajoute un peu de sucre ; la quantité de chaleur absorbée dans l'acte de dissolution du sucre est sensible, le liquide est refroidi, mais le refroidissement est bien moindre que dans les deux premiers cas. Ainsi, lorsque vous sucrez votre thé, vous le refroidissez savamment. Vous faites de même lorsque vous mettez du sel dans votre soupe ; et si vous ne cherchiez que le seul refroidissement, sans autre souci de la saveur de votre soupe, vous le hâteriez en substituant le salpêtre au sel.

Dans une leçon antérieure, j'ai fait usage d'un mélange de glace pilée et de sel pour obtenir un grand froid. Le sel et la glace lorsqu'ils sont ainsi mêlés ensemble, changent leur état d'agrégation, et la quantité de ce travail intérieur est si grande, que, pendant qu'il s'opère, la température du mélange s'abaisse de 16°, et plus, au-dessous du point de congélation de l'eau. J'ai ici une série de verres de montre que j'ai enveloppés d'une feuille mince d'étain et plongés dans un mélange de glace et de

sel. Chaque verre de montre contient un peu d'eau, dans laquelle plonge le fond du verre suivant. Les voici tous congelés et ne formant plus qu'un seul cylindre solide, par le froid de ce mélange de glace et de sel.

Je vais maintenant renverser les expériences et essayer de vous montrer la chaleur dégagée dans le passage de l'état liquide à l'état solide. Mais d'abord laissez-moi vous montrer que de la chaleur est rendue latente lorsque du sulfate de soude est dissous. J'expérimente avec cette substance exactement comme j'ai expérimenté avec le nitre, et vous voyez qu'à mesure que le cristal fond dans l'eau, la pile est refroidie. Voici maintenant l'expérience complémentaire. Ce grand matras de verre, B (fig. 45), avec son long col, est actuellement rempli d'une solution de sulfate de soude. Hier, mon préparateur après avoir fait dissoudre le sel dans une poêle sur le feu de notre laboratoire, a rempli le matras de cette dissolution. Il a soigneusement fermé ensuite le goulot du matras avec un morceau de vessie; et il a placé la bouteille derrière cette table, où elle est restée tranquille pendant la nuit.



Fig. 45.

Le liquide, en ce moment, est sursaturé de sulfate de soude. Lorsque l'eau était chaude, il s'en est plus fondu que si l'eau avait été froide. Mais maintenant la température est descendue bien au-dessous du point de saturation. Cet état de choses est rendu plus certain par la précaution prise de garder la solution tranquille et de faire en sorte que rien n'y tombât. L'eau maintenue ainsi dans un calme parfait peut être refroidie de plusieurs degrés au-dessous de zéro sans se congeler. Quelques-uns d'entre vous peuvent avoir remarqué que l'eau de leur pot à eau, après une froide nuit d'hiver, se gelait soudainement lorsqu'on la

versait le matin. Dans les climats froids, cela n'est pas rare. Eh bien ! les particules de sulfate de soude dans cette solution sont sur le bord d'un précipice, et je puis les y faire tomber en projetant simplement dans la solution un cristal de cette substance à peine plus gros qu'un grain de sable. Observez ce qui arrive ; la bouteille, actuellement, contient un liquide transparent et limpide ; j'y jette le morceau de cristal ; il ne s'y enfonce pas ; les molécules se sont pressées autour de lui pour former un solide dans lequel il est maintenant emprisonné. Le passage des atomes d'un état de liberté à un état de servitude a lieu tout à fait graduellement ; vous voyez la solidification s'étendre en descendant le long du cou de la bouteille. Voyez comment j'ai placé ma pile thermo-électrique. Sa face nue appuie contre la surface convexe de la bouteille, et l'aiguille du galvanomètre marque zéro. Le progrès de la cristallisation n'a pas encore atteint le liquide placé devant la pile, mais vous la voyez s'approcher. Voici que la solidification s'opère en avant de la pile, constatez son effet. Les atomes, en tombant à la forme solide, développent de la chaleur ; cette chaleur se communique à l'enveloppe de verre, l'enveloppe de verre échauffe la pile, et l'aiguille, comme vous voyez, fuit vers 90°. La quantité de chaleur rendue ainsi sensible par la solidification est exactement égale à celle qui avait été rendue latente par la liquéfaction.

Dans ces expériences, nous avons eu affaire à la chaleur latente des liquides ; laissez-moi maintenant appeler votre attention sur quelques expériences propres à mettre en évidence ce qu'on a appelé chaleur latente des vapeurs, en d'autres termes, la chaleur dépensée à communiquer de l'énergie potentielle, dans le passage du corps de l'état liquide à l'état gazeux. Comme auparavant je pose ma pile sur le dos, sa face nue tournée vers le haut ; et sur cette face nue, je place le bassin d'argent déjà employé, dans lequel j'ai versé une petite quantité d'un liquide volatil, chauffé à dessein. L'aiguille se meut maintenant, en indiquant de la chaleur : mais à peine a-t-elle atteint 90°, qu'elle revient promptement, descend à 0°, et fuit avec violence du côté du froid. Le liquide employé ici est de l'éther sulfurique ; il est très-volatil, et

la rapidité de son évaporation est telle qu'après avoir épuisé rapidement la chaleur qui lui avait été d'abord communiquée, il en emprunte à la face de la pile. Je retire l'éther, et je le remplace par de l'alcool, légèrement chauffé ; l'aiguille, comme auparavant, marche du côté de la chaleur. Mais attendez un instant ; je vais me servir de ce petit soufflet pour hâter l'évaporation de l'alcool ; maintenant vous voyez l'aiguille descendre, et la voici à 90° du côté du froid. L'eau est loin d'être aussi volatile que l'alcool ; cependant, je puis montrer également l'absorption de la chaleur par l'évaporation de l'eau. Nous nous servons pour contenir l'eau, d'une poterie assez poreuse pour laisser l'eau suinter à sa surface extérieure. L'évaporation se fait sur cette surface ; et parce que la chaleur nécessaire à ce travail est empruntée en grande partie à l'eau intérieure, celle-ci est refroidie. Les vases réfrigérants appelés alcarazas sont faits sur le même principe.

Pour vous montrer jusqu'où peut aller le refroidissement dû à l'évaporation de l'eau, j'ai recours à un instrument (fig. 46), dans





Fig. 46.

lequel la congélation de l'eau a pour cause unique la soustraction de sa chaleur par sa propre vapeur. Cet instrument s'appelle *cryophore* ou porte-glace, et il a été inventé par le docteur Wollaston ; voici comment il est fait. On introduit un peu d'eau dans la boule A : lorsque l'autre boule B a été ramollie par la chaleur, on la prolonge au fond par un petit tube terminé en pointe fine ouverte à son extrémité. Cela posé, on a fait bouillir l'eau en A, jusqu'à ce qu'elle ait chassé par la petite ouverture tout l'air de la boule située à distance. Lorsque les deux boules et le tube qui les unit

sont pleins de vapeur exempte d'air, on ferme la petite ouverture au chalumeau. On n'a plus alors que de l'eau et sa vapeur, avec à peine une trace d'air. Aussi, vous entendez le liquide retentir exactement comme dans le cas du marteau d'eau.

Je fais passer tout le liquide dans la boule A, que je plonge dans un verre vide, pour la défendre des courants d'air ; et je plonge la boule vide B dans un mélange réfrigérant ; de cette manière, la vapeur qui s'échappe du liquide de la boule A est condensée en eau par le froid dans la boule B. Cette condensation permet la formation de nouvelles quantités de vapeur. A mesure que l'évaporation continue, l'eau qui fournit la vapeur se refroidit de plus en plus. Dans un quart d'heure ou vingt minutes, elle sera convertie en un gâteau de glace. Voici le solide opalescent formé dans un second appareil que vous m'avez vu disposer au commencement de la leçon. Tout le procédé consiste en un transport non compensé de mouvement d'une boule à l'autre.

Mais l'exemple le plus frappant de la consommation de chaleur dans le changement d'état des corps est fourni par la substance que j'ai emprisonnée dans cette forte bouteille de fer. La bouteille contient de l'acide carbonique, liquéfié par une pression énorme. Cette substance, vous le savez, est un gaz dans les circonstances ordinaires ; voici un bocal qui en est plein, et, quoiqu'il manifeste sa nature en éteignant une bougie allumée, l'œil ne pourrait le distinguer de l'air ordinaire. Lorsqu'on ouvre le robinet qui ferme la bouteille de fer, la pression supportée par le gaz diminue ; le liquide bout, éclate subitement comme s'il s'était spontanément réduit en gaz, qui se précipite par l'orifice avec une force impétueuse. Vous suivez sans peine de l'œil ce courant de gaz ; mêlée avec lui, vous apercevez une substance blanche, qui est maintenant soufflée contre moi, d'une distance de trois ou quatre mètres à travers l'air. Qu'est-ce que cette substance blanche ? C'est de la neige d'acide carbonique. Le froid produit dans le passage de l'état liquide à l'état gazeux est si intense, qu'une portion de l'acide carbonique est réellement solidifiée, au point de former cette neige, qui se mêle en petits flo-

cons au torrent de gaz qui sort de l'appareil. Je puis recueillir cette neige dans un vase convenable, dans cette boîte cylindrique armée de deux manches creux par lesquels le gaz peut s'échapper. A droite et à gauche, vous voyez le torrent de gaz, mais une grande partie de l'acide congelé est retenue dans la boîte. Je l'ouvre, et vous la voyez remplie de cette neige d'acide carbonique parfaitement blanche.

Cette neige solide disparait peu à peu ; sa conversion en vapeur est lente, parce qu'elle ne peut emprunter que très-lentement aux substances environnantes la chaleur nécessaire à sa vaporisation. Vous pouvez la manier librement, mais ne la pressez pas trop, de peur qu'elle ne vous brûle. Elle est assez froide pour brûler la main. J'en plonge un morceau dans l'eau, et je l'y tiens immergé ; vous voyez des bulles s'élever à travers l'eau ; c'est du gaz acide carbonique pur. Je recueille ce gaz, et vous voyez qu'il possède toutes les propriétés du gaz tel qu'il est ordinairement préparé. L'acide solide ne se fond pas dans l'eau ; si je le lâchais, il monterait à la surface de l'eau et flotterait sur elle. J'en mets un morceau dans ma bouche, en prenant soin de ne pas respirer pendant qu'il y est. Je souffle contre cette bougie ; mon haleine éteint la flamme. Avant de terminer la leçon, je vous montrerai comment il est possible de conserver un corps aussi froid dans la bouche sans se faire de mal. Un morceau de fer qui serait aussi froid causerait des désordres graves.

Ici, donc, nous avons un corps solide excessivement froid, qui, néanmoins, ne refroidit pas les corps en contact avec lui, comme on pouvait s'y attendre. De fait, il n'y a pas eu de contact réel établi entre l'acide et mon doigt ou ma bouche. L'eau, nous le voyons, ne peut pas le dissoudre ; mais l'éther sulfurique le dissoudra ; et en versant une quantité de cet éther sur la neige, j'obtiens une masse pâteuse, douée d'un pouvoir énorme de réfrigération. Voici des masses épaisses et irrégulières de verre, des pieds de verre à boire ; je dépose sur chacun une portion d'acide solide, et je la mouille avec de l'éther ; vous entendez le verre craquer ; il a été brisé par la contraction née d'un froid si intense,

Dans ce bassin, j'ai étendu une feuille de papier ; je verse sur le papier un demi-kilogramme ou un kilogramme de mercure ; sur le mercure, je dépose de l'acide carbonique solide, et sur l'acide je verse un peu d'éther. Le mercure, vous le savez, exige une très-basse température pour se solidifier. Eh bien, le voici congelé; je le tourne et le retourne devant vous, comme une masse solide; je puis le marteler ; je puis aussi le couper avec un couteau. Pour pouvoir le soulever au-dessus du bassin, j'ai enfoncé dans son sein ce fil, par lequel je l'enlève et le plonge dans un bocal de verre contenant de l'eau. Il se liquéfie, il tombe en pluie abondante à travers l'eau ; et chaque filet de mercure gèle l'eau avec laquelle il arrive en contact, de sorte qu'autour de chaque filet, il se forme un tube de glace, à travers lequel vous pouvez voir couler le métal liquide. Ces expériences pourraient être multipliées presque indéfiniment ; mais j'en ai fait assez pour éclaircir le sujet que nous traitons.

J'appelle maintenant votre attention sur une autre et très-singulière classe de phénomènes, qui se rattachent à la production de la vapeur. Voici, d'une part, une grande capsule en porcelaine, B (fig. 47), remplie d'eau chaude, de l'autre, une coupe d'argent que je chauffe au rouge. Si j'enfonce la coupe d'argent dans l'eau chaude, qu'arrivera-t-il? Vous répondrez naturellement que la coupe cédera instantanément son excès de chaleur à l'eau, et se mettra avec elle en équilibre de température.

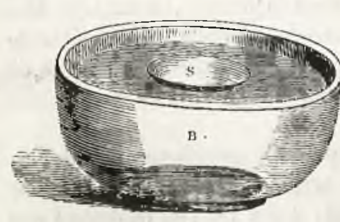


Fig. 47.

Mais il n'en est rien. La coupe pendant un certain temps fait naître au-dessous d'elle une quantité de vapeur assez grande pour la maintenir entièrement soulevée au-dessus de l'eau, qu'elle ne touche pas, c'est-à-dire, dans le langage de l'hypothèse développée dans notre troisième lecture, qu'elle est soulevée par une décharge de projectiles moléculaires contre sa surface inférieure. Cela dure jusqu'à ce que la température du bassin venant à baisser ne

puisse plus produire de la vapeur à une tension suffisante pour lutter contre le poids de la coupe ; elle arrive alors au contact de l'eau, et le sifflement ordinaire produit par un métal chaud plongé dans un liquide, ainsi que le nuage de vapeur apparu au-dessus de la coupe, vous annonce que le contact a eu lieu.

Je renverse maintenant l'expérience, et au lieu de placer la coupe dans l'eau, je place l'eau dans la coupe, non sans avoir encore porté sa température au rouge à l'aide de cette lampe. Pendant que je verse l'eau dans la coupe, vous n'entendez ni bruit d'ébullition, ni sifflement de vapeur. La goutte d'eau roule sur sa propre vapeur, c'est-à-dire qu'elle est soutenue par le recul ou la répulsion des projectiles moléculaires abandonnés par sa surface inférieure. Je retire la lampe, et je laisse la coupe se refroidir, jusqu'à ce qu'elle ne soit plus capable de produire une vapeur assez tendue pour tenir la goutte en suspension. Le liquide alors touche le métal ; à l'instant du contact, il se fait une ébullition violente, et vous voyez la coupe couverte d'un nuage de vapeur.

De la position où vous êtes, vous ne pouvez pas voir ce sphéroïde aplati, qui roule au fond de la coupe chaude ; mais je vais essayer de vous le montrer ; et si je suis assez heureux pour réussir, je vous rendrai témoins d'un très-beau spectacle. Tenez bien dans votre esprit qu'il y a au-dessous de la goutte un dégagement incessant de vapeur qui s'en échappe aussi sans cesse latéralement. Si la goutte appuyait contre une surface aplatie, qui se prêtât mal à la fuite latérale de la vapeur, celle-ci ferait irruption par le centre de la goutte. Mais j'ai tout arrangé de manière que la vapeur puisse s'échapper latéralement ; il arrive alors quelquefois que la sortie de la vapeur est rhythmique, qu'elle s'échappe par pulsations régulières, et dans ce cas la goutte d'eau prend la forme d'une très-belle rosace. Elle m'apparaît maintenant comme une masse ronde de liquide, de cinq centimètres de diamètre, avec une bordure admirablement dentelée. Je fais tomber sur elle ce faisceau de lumière électrique qui l'éclaire et rebondit à sa surface ; en recevant sur cette lentille le faisceau réfléchi, j'espère projeter au plafond ou sur l'écran une image

distincte de la goutte. La voici (fig. 48) ; l'image a un mètre cinquante de diamètre, et la vapeur s'échappe comme en cadence de ses bords. Si j'ajoute un peu d'encre, de manière à assombrir



Fig. 48.

le liquide, ses bords sont mieux définis, mais l'éclat perlé de sa surface a disparu. Je retire la chaleur ; l'ondulation continue pendant quelque temps : mais les bords ont cessé d'être dentelés. La goutte tout à fait dénuée de mouvement est redevenue un sphéroïde liquide, qui maintenant s'étale sur la surface intérieure de la coupe ; le contact est établi, et l'état sphéroïdal n'existe plus.

Je retire la coupe d'argent, je l'installe, son fond en haut, en avant de la lampe électrique, et avec une lentille dressée sur le trajet du rayon réfléchi, je projette sur un écran une image distincte du fond arrondi de la coupe ; je plonge cette éponge dans l'alcool et je la presse sur le fond froid de la coupe, de sorte que le liquide tombe goutte à goutte sur la surface du métal : vous voyez l'image des gouttes agrandies sur l'écran, et vous remarquez que dès qu'elles ont frappé la surface, elles s'éparpillent et ruissellent le long des bords. Maintenant, je vais chauffer la coupe en plaçant une lampe sous elle. Observez ce qui se passe ;

lorsque je presse l'éponge, les gouttes descendent comme auparavant, mais lorsqu'elles arrivent en contact avec le bassin, elles ne retombent plus en pluie, elles roulent au contraire sur la surface chaude comme des sphères liquides (fig. 49). Vous voyez même



Fig. 49.

au contraire qu'elles bondissent et dansent comme si elles étaient tombées sur un ressort élastique; et c'est en effet ce qui leur arrive. Chaque goutte, alors qu'elle frappe la surface chaude et roule sur elle, développe de la vapeur qui la soulève, détruisant ainsi toute cohésion entre la surface et la goutte, et permettant à celle-ci de conserver sa forme sphérique ou sphéroïdale.

Voici une disposition suggérée par M. le professeur Poggendorf, et qui montre, d'une très-belle manière, la rupture de contact entre la goutte sphéroïdale et la surface qui la supporte. De la coupe d'argent, B (fig. 50), destinée à contenir la goutte, je mène un fil *w* à l'un des bouts du fil d'un galvanomètre, placé à une certaine distance; j'attache l'autre bout du fil du galvanomètre à l'un des pôles d'une petite pile A. Du pôle opposé de la petite pile, part un second fil *w'* que j'attache au bras

a b, d'un support de cornue K, de sorte que je puisse aisément l'abaisser ou l'élever. Je chauffe la coupe, je verse de l'eau

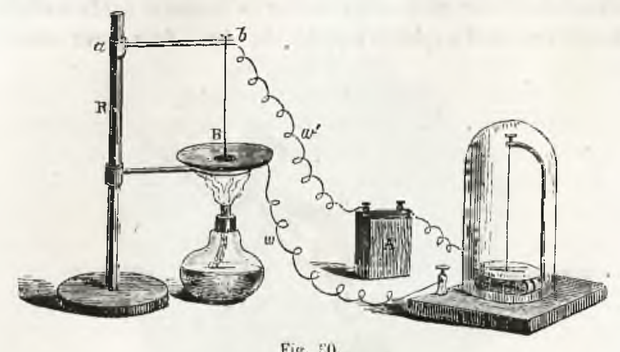


Fig. 50.

dedans, et j'abaisse mon fil jusqu'à ce que son extrémité s'enfonce dans la masse sphéroïdale ; vous n'apercevez pas de mouvement dans l'aiguille du galvanomètre ; la seule lacune dans tout le circuit est celle qui existe maintenant sous la goutte. Si elle était en contact avec la coupe, le courant passerait. Voici comment je le prouve ; je retire la lampe ; l'état sphéroïdal finira

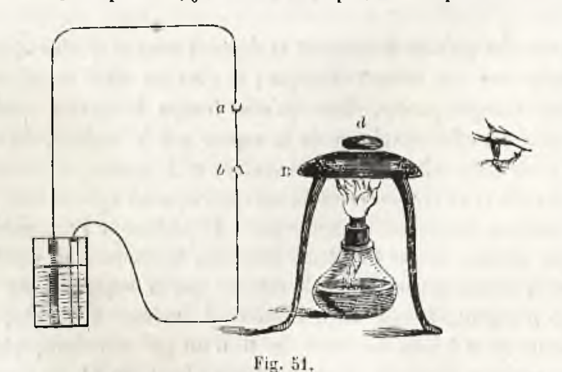


Fig. 51.

bientôt : le liquide touchera le fond. C'est ce qui a lieu maintenant, et aussitôt l'aiguille fuit en tournant.

On peut, au reste, voir directement l'espace vide entre la goutte et la surface chaude sur laquelle elle repose. L'expérience, individuelle se fait de la manière suivante. Soit B (fig. 51), une coupe assez plate renversée, et dont le fond est légèrement creusé de manière à pouvoir porter une goutte de liquide; chauffez le bassin avec une lampe à esprit-de-vin, et placez dessus une goutte d'encre *d*, additionnée d'un peu d'alcool. Tendez un fil de platine *a b*, verticalement derrière la goutte, et rendez le fil incandescent en y faisant passer un courant d'électricité. Mettez votre œil au niveau du fond de la goutte, et vous verrez le fil chauffé au rouge à travers l'intervalle qui sépare la goutte de la surface qui la porte. Permettez que je vous montre à tous ce même intervalle. Je place ma coupe B (fig. 52), comme tout à



Fig. 52.

l'heure, avec son fond en haut, en face de la lampe électrique; je chauffe la coupe et je lui superpose avec précaution une goutte *d*, suspendue à une pipette. Lorsque la goutte correspond à un point convenable de la surface, que la lentille convergente est à la distance voulue, vous voyez une ligne de lumière brillante se dessiner entre la goutte et l'argent, et indiquer ainsi que le faisceau de lumière a passé sous la goutte en allant à l'écran.

L'état sphéroïdal a été d'abord observé par Leidenfrost, et je puis le mettre en évidence par cinquante autres expériences. Je pourrais faire rouler des liquides sur des liquides, etc. De plus, si je prends cette boule de cuivre chauffée au rouge et que je la plonge dans un vase d'eau chaude, il se produit un bruit intense dû à l'échappement de la vapeur engendrée. Cependant le contact du liquide et du solide n'est que partiel : laissez la boule se refroidir, le liquide finit par la toucher ; et alors l'ébullition est si violente qu'elle projette l'eau hors du vase de tous les côtés.

M. Boutigny a, depuis peu, donné un nouvel intérêt à l'état sphéroïdal, en élargissant le champ de ses démonstrations expérimentales, et l'appliquant à l'explication de plusieurs faits extraordinaires. Si la main est moite, on peut la faire passer à travers un large jet de métal fondu sans crainte de brûlure. J'ai vu moi-même M. Boutigny couper avec sa main légèrement mouillée une veine de fer fondu, et faire jaillir d'un creuset avec ses doigts le métal en pleine fusion. Un forgeron exercé lèche avec sa langue du fer chauffé à blanc sans craindre de se brûler. Sa langue est en effet préservée du contact avec le fer, par la vapeur développée ; et c'est à la vapeur d'acide carbonique qui me défendait du contact du gaz solide, que j'ai dû mon salut quand je l'ai introduit dans ma bouche. M. Boutigny attribue à cette même influence protectrice plusieurs cas extraordinaires de préservation du feu dans les épreuves légales des anciens temps. Je dois ajouter, que l'explication physique de l'état sphéroïdal donnée par M. Boutigny n'a pas été acceptée par les savants.

Des explosions de chaudières ou générateurs ont aussi été attribuées à l'eau qui aurait pris d'abord l'état sphéroïdal, et qui, plus tard, arrivant en contact avec le métal moins chaud, se serait subitement réduite en vapeur. Nous sommes, en cette matière, plus ignorants que nous ne devrions l'être. La physique expérimentale, il est vrai, nous a révélé diverses causes, qui peuvent intervenir dans ces terribles catastrophes, mais la science pratique n'a pas encore découvert sur quelle échelle ces causes entrent réellement en opération. L'effet d'une génération soudaine de la vapeur a été démontré par une expérience que je veux répéter.

maintenant en votre présence. Voici un vase de cuivre (fig. 53), avec un col que je puis fermer avec ce bouchon, à travers lequel

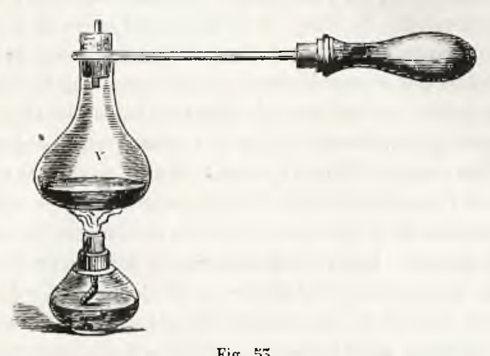


Fig. 53.

passe un tube fin de verre long d'un centimètre. Je chauffe le vase de cuivre, et j'y verse un peu d'eau. Le liquide est maintenant à l'état sphéroïdal. Je bouche le vase, et la petite quantité de vapeur développée, pendant que l'eau demeure à l'état sphéroïdal, s'échappe par le tube de verre. Je retire maintenant le vase de dessus la lampe, et j'attends une minute ou deux : l'eau arrivera bientôt au contact du cuivre; c'est ce qui a lieu maintenant, et vous voyez le résultat ; le bouchon est projeté, comme par l'explosion de la poudre à canon, à une hauteur considérable dans l'atmosphère.

J'ai réservé, pour la conclusion de la leçon d'aujourd'hui, l'expérience que vous regarderez probablement comme la plus intéressante de toutes les expériences ayant pour objet le phénomène que nous étudions. Par le moyen de l'acide sulfureux, M. Boutigny a le premier fait congeler de l'eau dans un creuset chauffé au rouge ; et M. Faraday, allant plus loin encore, a fait congeler le mercure dans ce même creuset, au moyen de l'acide carbonique solide. Je vais essayer de reproduire ce dernier fait ; mais permettez que j'opère d'abord avec de l'eau. Voici une sphère creuse de laiton de deux pouces environ de diamètre, et

parfaitement remplie d'eau. Sur cette sphère j'ai vissé ce fil qui doit me servir de manche. Je chauffe ce creuset de platine jusqu'au rouge blanc, et j'y fais tomber quelques morceaux d'acide carbonique solide. Je verse de l'éther sur l'acide. Ni l'acide ni l'éther n'arrivent au contact du creuset chaud. Ils sont préservés de ce contact par le coussin élastique de vapeur qui les entoure. Je fais descendre ma sphère d'eau jusqu'au contact de la masse, et je tasse avec précaution les fragments d'acide carbonique, en ajoutant encore un peu d'éther. La masse pâteuse au sein du creuset, chauffé au rouge blanc, reste extrêmement froide, et voici que vous entendez un craquement ; c'est un indice certain que l'expérience réussira. L'eau en se congelant a fait crever la sphère de laiton, comme elle a fait crever la bouteille de fer dans une expérience antérieure. J'ai entouré la sphère d'un fil en métal, pour empêcher la glace de tomber ; j'enlève l'enveloppe brisée de laiton, et vous voyez apparaître une sphère solide de glace sortant d'un creuset chauffé au rouge.

Je place une certaine quantité de mercure dans une cuiller conique de cuivre, et je la plonge dans le creuset. L'éther dans le creuset a pris feu, ce que je ne cherchais nullement. L'expérience doit être faite de telle sorte que le gaz acide carbonique, les vapeurs méphitiques des mines, défende l'éther de l'ignition; mais le mercure ne se congèlera pas moins. Je retire la cuiller du feu à travers la flamme, et voici que je renverse devant vous sur la table la masse congelée de mercure.

LEÇON VI

(27 FÉVRIER, 1862)

Convection ou transport de l'air échauffé. — Vents. — Vents alizés supérieur et inférieur. — Effet de la rotation de la terre sur la direction du vent. — Influence de la vapeur aqueuse sur le climat. — L'Europe condenseur de l'Atlantique occidental. — Chutes de pluie en Irlande. — Le Gulf-Stream. — Formation de la neige. — Formation de la glace provenant de la neige. — Glaciers. — Phénomènes du mouvement des glaciers. — Régélation. — Moulage de la glace par la pression. — Anciens glaciers

APPENDICE. — Données concernant le mouvement des glaciers.

Je me propose de consacrer une heure aujourd'hui à la considération de quelques-uns des phénomènes physiques qui se présentent sur une grande échelle dans la nature.

Parlons d'abord des vents. Vous voyez ces couronnes de becs de gaz, maintenant presque éteints, et destinés à éclairer cette salle lorsque la lumière du jour est interceptée ou tombée. Ce n'est pas seulement pour donner de la lumière qu'ils sont placés là ; ils y ont été mis, en partie, pour déterminer la ventilation. L'air, échauffé par la flamme du gaz, se dilate, et s'échappe dans l'atmosphère en un fort courant vertical. L'air de la salle est par là incessamment appelé en haut, et une nouvelle provision d'air frais vient par en bas réparer la perte causée par la ventilation. Les gaz et vapeurs aspirés par nos cheminées sont autant de vents verticaux dus à l'échauffement de l'air par nos foyers.

J'allume ce morceau de papier d'emballage, la flamme monte ; je souffle sur la flamme et laisse fumer les bords du papier ; ces

bords brûlants échauffent l'air et produisent des courants qui font monter la fumée. Je plonge le papier fumant dans un grand flacon de verre, dont je ferme le goulot pour empêcher la fumée de s'échapper ; la fumée monte, emportée par l'air léger du milieu, se répand latéralement en haut, se refroidit, et retombe comme une cascade de nuages le long des parois du flacon J'ai ici une spatule pesante de fer, chauffée au rouge sombre; de la manière dont je la tiens, vous ne pouvez pas voir les courants d'air qui s'en échappent et s'élèvent. Mais je puis vous les montrer par leur action sur une très-forte lumière. Je place la spatule dans le faisceau de lumière électrique ; vous apercevez son ombre sur l'écran entouré de lignes ondulées de lumière et d'ombre, indices certains des courants ascendants d'air chaud. Voici encore une cuiller de fer contenant du soufre que je chauffe jusqu'à ce qu'il s'enflamme ; je plonge le soufre dans cette jarre d'oxygène; la combustion devient plus brillante et plus énergique ; l'air de la jarre entre dans une agitation violente, et les fumées du soufre rendent visibles à vos regards les tempêtes que l'échauffement de l'air fait naître au sein de ce récipient. Je me sers à dessein du mot *tempête*, car les ouragans qui désolent la terre ne sont que la manifestation en grand des effets que vous avez vus se produire dans ce vase en verre.

Nos vents dérivent tous de la chaleur du soleil. Nous vivons au fond d'un océan aérien perméable à un très-haut degré aux rayons du soleil, et très-peu troublé par leur action directe. Mais ces rayons, lorsqu'ils tombent sur la terre, échauffent sa surface ; l'air en contact avec cette surface participe de sa chaleur, se dilate et monte dans les régions supérieures de l'atmosphère. Là où les rayons tombent d'aplomb sur la terre, c'est-à-dire entre les tropiques, l'élévation de la température de la surface est la plus grande. Les courants d'air chaud montent et se déversent latéralement au nord et au sud vers les pôles, en même temps que l'air froid et plus lourd des régions polaires se précipite pour prendre la place de l'air chaud et plus léger de l'équateur. Nous avons ainsi une circulation incessante. J'ai fait hier l'expérience suivante dans la salle chaude d'un bain turc. J'ai ouvert entière-

ment la porte, vers le milieu de sa hauteur, à égale distance du bas et du haut, j'ai installé une bougie allumée : la flamme de la bougie s'élançait droite. J'ai placé la bougie sur le sol; elle était soufflée violemment en dedans. Je l'ai placée en haut; elle était soufflée violemment en dehors. Nous avions donc deux courants d'air ou vents, glissant l'un sur l'autre, et se mouvant dans des directions opposées. C'est aussi ce qui arrive pour notre hémisphère. Nous avons un courant allant de l'équateur vers le nord, dans les régions plus élevées de l'atmosphère, et un courant allant des pôles vers l'équateur dans les régions plus basses de l'atmosphère. Ce sont les vents connus sous le nom d'alizés supérieur et inférieur.

Si la terre était immobile, ces deux courants iraient directement du sud au nord, et du nord au sud; mais la terre tourne de l'ouest à l'est autour de son axe une fois dans chaque vingt-quatre heures. En vertu de cette rotation, un individu situé à l'équateur est emporté circulairement avec une vitesse de 1 600 kilomètres à l'heure. Vous avez, sans doute, observé ce qui arrive quand une personne sort sans précaution d'une voiture en mouvement. Elle est animée de la vitesse de la voiture, et lorsque son pied touche la terre, elle est poussée en avant dans la direction de cette vitesse. C'est ce qui rend presque toujours fatal l'acte de sauter d'un wagon sur la berge, lorsque le train est en pleine marche. Quand nous nous éloignons de l'équateur, la vitesse due à la rotation de la terre se ralentit, elle devient nulle aux pôles. En un point quelconque, elle est proportionnelle au rayon du parallèle de la latitude, et diminue à mesure que ce cercle diminue lui-même. Cela posé, imaginez un individu soudainement transporté de l'équateur en un lieu où la vitesse, due à la rotation, n'est plus que de 1 500 kilomètres à l'heure; en touchant la terre, il devra être poussé en avant dans la direction de l'est avec une vitesse de 100 kilomètres à l'heure, différence entre la vitesse avec laquelle il était entraîné à l'équateur, et la vitesse à la surface de la terre dans sa nouvelle position.

Des considérations semblables s'appliquent au transport de l'air des régions équatoriales aux régions septentrionales, et *vice*

versa. A l'équateur, l'air possède la vitesse de la terre en ce point; et en la quittant, il doit obéir non-seulement à sa tendance vers le nord, mais aussi à sa tendance vers l'est; il prendra donc une direction moyenne ou résultante. Plus il va loin au nord, plus il est dévié de sa direction première, plus il tourne vers l'est, plus il devient ce que nous appellerons un vent ouest. Le contraire a lieu pour le courant venant du nord; celui-ci passe d'un lieu où la vitesse est plus petite à un lieu où la vitesse est plus grande, et son mouvement s'accorde avec celui de la terre. Voilà pourquoi le vent qui a d'abord soufflé du nord est bientôt un vent nord-est, et tend à devenir de plus en plus un vent d'est, à mesure qu'il s'approche de l'équateur.

Ce n'est pas par le raisonnement seul que nous arrivons à la connaissance de l'existence des courants atmosphériques supérieurs, quoique le raisonnement suffise à prouver qu'il doit y avoir compensation de manière ou d'autre, qu'un vent ne peut pas souffler dans une direction sans qu'un déplacement égal d'air ait lieu dans la direction opposée. Mais sous les tropiques on voit quelquefois, dans les régions supérieures de l'atmosphère, des nuages qui se meuvent dans une direction opposée à la direction actuelle du vent. A la surface de la terre, si nous pouvions lancer un corps léger avec assez de force pour lui faire traverser le courant inférieur et atteindre le courant supérieur, la direction du mouvement de ce corps nous donnerait la direction du vent supérieur. Cette expérience est au-dessus des forces humaines, mais elle n'en a pas moins été faite. Des cendres ont été lancées à travers le courant inférieur par des volcans, et, du lieu où elles sont tombées plus tard, on a pu conclure la direction du vent qui les avait transportées. Le professeur Dove dans ses « *Witterungs Verhältnisse von Berlin* » (Relations du temps) cite l'exemple suivant : « Dans la nuit du 30 avril on entendit à Barbados des explosions semblables à celles d'une grosse artillerie, ce qui fit que la garnison du fort Sainte-Anne demeura toute la nuit sous les armes. Le 1er mai, au lever du jour, la partie orientale de l'horizon paraissait claire, tandis que le reste du firmament était voilé d'un nuage noir, qui bientôt s'étendit à

l'est, éteignit la lumière du jour, et à la longue produisit une obscurité si épaisse qu'on ne distinguait plus les fenêtres de la chambre. Il tomba une pluie de cendres sous laquelle les branches des arbres pliaient et se rompaient. D'où venaient ces cendres? A en juger par la direction du vent, nous aurions conclu qu'elles venaient du pic des Açores; elles venaient, cependant, du volcan Morne Garou dans l'île Saint-Vincent, située à plus de 160 kilomètres à l'ouest de Barbados. Les cendres avaient été lancées dans le courant du vent alizé supérieur. Un second fait du même genre arriva le 20 janvier 1835. Le 24 et le 25, le soleil fut obscurci à la Jamaïque par une pluie de cendres fines, lancées par la montagne Coseguina, distante de 1 280 kilomètres. La population apprit ainsi que les explosions, auparavant entendues par elle, n'étaient pas celles d'une artillerie. Ces cendres ne peuvent avoir été transportées que par le courant supérieur, car la Jamaïque est située au nord-est de la montagne. Cette éruption fournit en même temps une belle preuve de ce fait, que le courant d'air ascendant se divise en haut, car des cendres tombèrent aussi sur le vaisseau *Conway* dans le Pacifique, à une distance de 1 100 kilomètres au sud-ouest de Coseguina.

« Aucun voyageur, même en traversant les plus hauts sommets des Andes, n'a encore atteint l'alizé supérieur. Cette circonstance nous permet de nous former quelque idée de la force des explosions que nous venons de rappeler; elles furent véritablement épouvantables. Le mugissement de la montagne Coseguina fut entendu à San Salvador, distant de 1 600 kilomètres. Union, port de mer sur la côte ouest de Conchagua, fut plongé dans une obscurité absolue pendant quarante-trois heures; lorsque la lumière commença à poindre, on remarqua que le rivage de la mer avait reculé de 245 mètres vers l'Océan, par suite de la quantité énorme de cendres tombées. L'éruption du Morne Garou fut le dernier anneau d'une chaîne d'efforts volcaniques s'exerçant sur une échelle immense. En juin et juillet 1811, près de San Miguel, l'une des Açores, l'île Sabrina s'éleva, accompagnée de fumée et de flammes, du fond d'une mer de 50 mètres de profondeur, atteignit une hauteur de 100 mètres

et une circonférence de près de 2 000 mètres. Les petites Antilles furent ébranlées à leur tour, puis les vallées du Mississipi, de l'Arkansas et de l'Ohio. Mais les forces élastiques ne trouvant pas d'issue dans cette direction, en cherchèrent une vers la côte nord de la Colombie. Le 26 mars, la chaleur fut extraordinaire à Caraccas ; l'air était limpide et le firmament sans nuages. C'était le jeudi de la Fête-Dieu, un régiment de troupes de ligne se tenait sous les armes dans les casernes du quartier San Carlos prêt à se joindre à la procession. Le peuple s'assemblait en foule dans les églises. Un tonnerre souterrain sourd se fit entendre, suivi immédiatement après d'une secousse de tremblement de terre si violente, que l'église d'Alta Gracia, haute de 50 mètres, supportée par des piliers de 5 mètres d'épaisseur, ne fut plus qu'un monticule de décombres et de poussière, de moins de 2 mètres de hauteur. Le soir, la lune, presque pleine, éclairait de son éclat doux et triste les ruines de la ville, sous lesquelles gisaient les corps écrasés de plus de 10 000 de ses habitants. Mais là encore les forces élastiques souterraines ne trouvèrent pas à s'épancher suffisamment au dehors. Enfin, le 27 avril, elles réussirent à s'ouvrir une fois de plus le cratère du Morne Garou, qui était fermé depuis un siècle ; et la terre, à une distance égale à celle qui sépare le Vésuve de Paris, retentissait des cris de tonnerre du prisonnier brisant ses chaînes. »

Voici un globe terrestre sur lequel je trace avec mes doigts deux cercles méridiens ; ils partent de l'équateur à la distance l'un de l'autre de 33 centimètres, qui sur la surface de la terre correspondent à une distance d'environ 1 600 kilomètres. Ces méridiens, à mesure qu'ils avancent vers le nord, se rapprochent graduellement l'un de l'autre, et se rencontrent au pôle nord. Il en résulte évidemment que l'air qui s'élève entre ces deux méridiens dans les régions équatoriales, devrait, s'il allait directement au pôle, se comprimer lui-même dans un lit de plus en plus étroit. Si la terre était un cylindre au lieu d'être une sphère, nous aurions une double circulation, un double courant d'air d'aller, du milieu du cylindre à ses deux extrémités, et une double circulation de retour, de chaque extrémité au milieu du cy-

lindre. Mais dans le cas de la terre, ce mode de circulation devient impossible, précisément parce que l'espace qui entoure les pôles est incapable de contenir l'air parti de l'équateur. Cet air refroidi tombe donc ou s'abaisse, et le courant de retour s'établit avant que les pôles aient été atteints, d'une manière plus ou moins irrégulière. Il y a plus, les deux courants, au lieu de couler l'un sur l'autre, coulent souvent l'un à côté de l'autre. Ils constituent des fleuves d'air, qui changent incessamment de lit.

Ainsi naissent les grands vents de notre atmosphère, matériellement modifiés toutefois par la distribution irrégulière des terres et des eaux. Des vents de moindre importance naissent aussi de l'action locale de la chaleur, du froid et de l'évaporation. Il est des vents produits par l'échauffement de l'air dans les vallées des Alpes, qui quelquefois s'élancent avec une violence soudaine et destructive à travers les gorges des montagnes. Il est des bouffées agréables d'air descendant produites par la présence des glaciers sur les hauteurs. Il est des brises de terre et des brises de mer dues aux variations de température du sol du rivage, pendant le jour et la nuit. Le soleil du matin, échauffant la terre, détermine un déplacement vertical d'air, que l'air plus froid de la mer vient compenser en soufflant vers la terre. Le soir, la terre est plus refroidie par le rayonnement que la mer, les conditions sont inverses; l'air pesant de la terre souffle alors vers la mer.

Ainsi donc, une portion de la chaleur des tropiques est emportée vers les pôles par un messager aérien, et c'est ainsi qu'une distribution plus égale de la chaleur terrestre se trouve assurée. Mais dans sa fuite vers le nord, l'air est accompagné d'une autre substance, de la vapeur d'eau, laquelle, vous le savez, est parfaitement transparente. Imaginez-vous l'Océan des tropiques émettant sa vapeur, laquelle facilite par sa légèreté l'ascension de l'air auquel elle est associée. Tous deux se dilatent en montant. A la hauteur de 5 000 mètres, ils devront occuper un volume double de celui qu'ils occupaient au niveau de la mer. Pour se procurer cet espace, ils doivent, par leur force élastique, refouler l'air dans toutes les directions autour d'eux, et ce travail ne peut s'exécuter qu'aux dépens de la chaleur qu'ils possédaient en partant.

La vapeur ainsi refroidie ne peut pas conserver plus longtemps la forme gazeuse. Elle se précipite en nuage : le nuage descend en pluie, et dans les régions de calme, que les rayons du soleil frappent d'aplomb, là où l'air se décharge pour la première fois de son fardeau aqueux, la quantité de pluie qui tombe est énorme. Le soleil n'est pas toujours dans la verticale d'un même parallèle de latitude. Il est quelquefois au nord, quelquefois au sud de l'équateur, son excursion restant limitée par les deux tropiques. Lorsqu'il est au sud de l'équateur, la surface de la terre au nord de cet équateur n'est plus dans la région de calme, mais dans une région que le courant aérien venant du nord traverse pour gagner la région de calme. Ce courant d'air n'est que légèrement chargé de vapeurs, et pendant qu'il avance du nord au sud, il devient de plus en plus chaud ; c'est un vent sec, dont la capacité de saturation par la vapeur va continuellement en augmentant. Il résulte très-clairement de ces considérations, que chaque lieu situé entre les tropiques doit avoir sa saison sèche et sa saison pluvieuse ; sèche, lorsque le soleil est du côté opposé de l'équateur, humide, lorsque le soleil tombe d'aplomb sur lui.

Revenons au courant supérieur parti de l'équateur. A mesure que, s'avançant vers les pôles, il devient graduellement plus froid et plus dense, il s'abaisse vers la terre. Au pic de Ténériffe, il est déjà descendu au-dessous du sommet de la montagne. Avec le vent contraire soufflant à la base, le voyageur rencontre au sommet un fort courant venu de l'équateur. Plus loin, au nord, le vent de l'équateur est tombé plus bas encore, il finit par atteindre tout à fait la surface de la terre. L'Europe, en très-grande partie, est envahie par ce courant équatorial. Ici, à Londres, pendant huit ou neuf mois de l'année, les vents du sud-ouest prévalent. Et remarquez quelle influence cette prédominance doit avoir sur notre climat. L'humidité de l'océan Équatorial vient à nous douée d'une énergie potentielle, avec ses molécules séparées, aptes par conséquent à se heurter, et à développer de la chaleur par leur collision ; il est, si vous voulez, comme chargé de chaleur latente. Dans notre atmosphère septentrionale, la collision a lieu réellement, et la chaleur engendrée est pour notre climat

une cause importante de réchauffement. Sans la rotation de la terre, nous recevrions les bouffées chaudes et sèches de l'Afrique. Mais, grâce à cette rotation, le vent qui, parti du golfe du Mexique, irait au nord, est détourné vers l'Europe. L'Europe est, par conséquent, le récipient de ces provisions de chaleur latente amassées dans l'Atlantique occidental. Les îles de la Grande-Bretagne ont la plus grande part de cette humidité et de cette chaleur, et cette circonstance s'ajoutant à celle dont il a déjà été question, la chaleur spécifique si élevée de l'eau contribue puissamment à défendre notre climat des froids et des chaleurs extrêmes. C'est à cet état de choses que nous devons et nos champs si verts, et les joues roses de nos jeunes filles. Un écrivain allemand, Moritz, s'exprime à ce sujet dans ces termes : « Visages si fleuris et si jeunes, prés verts, fleuves limpides de cet heureux pays, combien vous m'avez enchanté ! O Richemond, Richemond ! Pourrais-je jamais oublier le soir où, plein de délices, j'errais près de vous, allant et venant, sur les bords fleuris de la Tamise. Tout cela cependant ne saurait me détacher de ce sol sec et sablonneux auquel le destin a limité ma sphère d'action. » Toute cette poésie, tout cet enchantement a sa source directe dans la vapeur aqueuse [1].

A mesure qu'en Europe nous avançons plus vers l'est, la quantité d'eau précipitée de l'atmosphère devient de moins en moins grande ; l'air se décharge de plus en plus de son humidité. Entre les côtes orientales et occidentales de nos îles, la différence est déjà sensible, et des circonstances locales ont, en outre, une influence considérable sur la quantité de pluie.

Le docteur Lloyd a trouvé que la température moyenne annuelle des côtes occidentales de l'Irlande surpasse d'environ deux degrés celle de la côte orientale à la même altitude, et sur le même parallèle. Les quantités totales de pluie tombée en 1851, dans les diverses stations de l'île, sont données par le tableau suivant :

[1] Sa relation à la chaleur rayonnante est développée dans la leçon XI.

Stations.	Pluie en pouces.
Portarlington	21.2
Killough	23,2
Dublin	26,4
Athy	26,7
Donaghadec	27,9
Courtown	29,6
Kilrush	32,6
Armagh	33,1
Killybegs	33,2
Dunmore	33,5
Portrush	37,2
Burincrana	39,3
Markree	40,3
Castletownsend	42,5
Westport	45,9
Cahirciveen	59,4

Le docteur Lloyd fait au sujet de ce tableau les remarques suivantes :

« 1° Il y a de grandes différences entre les quantités annuelles de pluie tombée dans ces diverses stations, situées toutes cependant, à l'exception de quatre, à quelques mètres seulement au-dessus du niveau de la mer. La pluie la plus abondante (à Cahirciveen) est près de trois fois la moins abondante (à Portarlington).

« 2° Les stations de pluie moindre sont ou dans l'intérieur du pays, ou sur la côte orientale ; tandis que les stations de plus grande pluie sont sur les côtes ou près des côtes occidentales.

« 3° La quantité de pluie est grandement dépendante de la proximité d'une chaîne ou d'un groupe de chaînes de montagnes ; elle est toujours considérable dans un pareil voisinage, à moins que la station ne soit située au nord-est des montagnes.

« Ainsi, Portarlington est situé au nord-est de la chaîne de Silvebloom ; Killough, au nord-est de la chaîne de Mourne ; Dublin, au nord-est de la chaîne de Wicklow, et ainsi de suite. Les stations de plus grande pluie : Cahirciveen, Casteltownsend, Westport, etc., sont aussi dans le voisinage de hautes montagnes, mais du côté opposé [1]. »

[1] La pluie la plus abondante enregistrée par sir John Herschel dans sa

Cette distribution de la chaleur, par le déplacement de masses d'air échauffé d'un lieu à l'autre, a reçu le nom de *convection*, *transport*, pour le distinguer de la distribution par *conduction* ou *conductibilité*, dont nous traiterons dans notre prochaine leçon.

Ce même mode de distribution par convection se fait à travers les liquides. Voici une cuve en verre C (fig. 54) contenant de

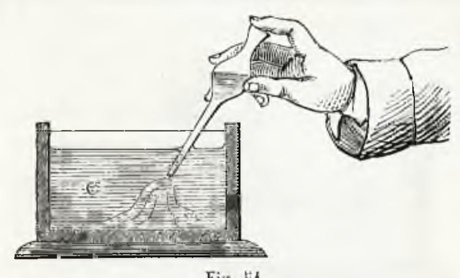


Fig. 54.

l'eau chaude ; je l'installe en face de la lumière électrique ; et, par l'intermédiaire d'une lentille convergente, je projette une image agrandie de la caisse sur l'écran. Je fais pénétrer l'extrémité de cette pipette au sein de l'eau de la caisse, et je laisse un peu d'eau froide se mêler doucement à l'eau chaude. La différence de réfraction entre les deux eaux suffit pour que nous puissions voir l'eau froide pesante tomber à travers l'eau chaude plus légère. L'expérience réussit mieux encore si je fais flotter un morceau de glace à la surface de l'eau. A mesure que la glace fond, elle laisse tomber de longues stries pesantes au fond de la cuve. Voyez, tandis que je fais mouvoir la glace au-dessus, comme ces filets d'eau froide descendent à travers l'eau chaude. Je renverse maintenant l'expérience, en mettant de l'eau froide dans

table (*Météorologie*, 110, etc.) est tombée à Cherra Pungee, où sa quantité annuelle est de 1 570 centimètres. Je ne veux pas m'arrêter plus longtemps à la météorologie ; je renvoie donc, pour plus ample et plus exacte information, aux excellents ouvrages de sir John Herschel et de M. le professeur Dove.

la caisse et de l'eau chaude dans la pipette. Il faut verser avec beaucoup de soin, pour que l'eau ne soit pas animée d'une certaine vitesse acquise, qui l'entraînerait mécaniquement au fond. Voyez ce qui se passe. La pointe de la pipette est au milieu de la cuve, et dès que l'eau chaude est entrée, elle remonte vite vers le haut (fig. 55) et déborde à la surface, presque comme le ferait de l'huile dans les mêmes circonstances.

Lorsqu'un vase contenant de l'eau est chauffé par le fond, la

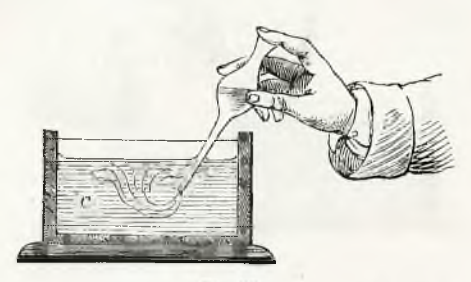


Fig. 55.

chaleur communiquée est ainsi diffusée. Vous pouvez, au moyen de la lampe électrique, voir la direction des courants chauds ascendants, et aussi celle des courants qui descendent pour remplacer l'eau plus légère. Voici un vase contenant de la cochenille, dont les fragments, à peine plus pesants que l'eau, suivent librement la direction de ses courants Vous voyez des parcelles de cochenille s'arracher du fond chauffé, monter par le centre de la cuve, et descendre de nouveau le long de ses parois. Dans les geysers de l'Islande, cette convection ou transport se produit sur une grande échelle. Un fragment de papier déposé au centre de l'eau, qui remplit le tube, est instantanément rejeté de côté, et disparaît entraîné ou sucé par le courant descendant.

En partie par cette cause, mais principalement peut-être sous l'action des vents, des courants s'établissent d'eux-mêmes au sein de l'Océan, et viennent exercer une très-grande influence sur les climats, par la chaleur qu'ils distribuent. Le plus re-

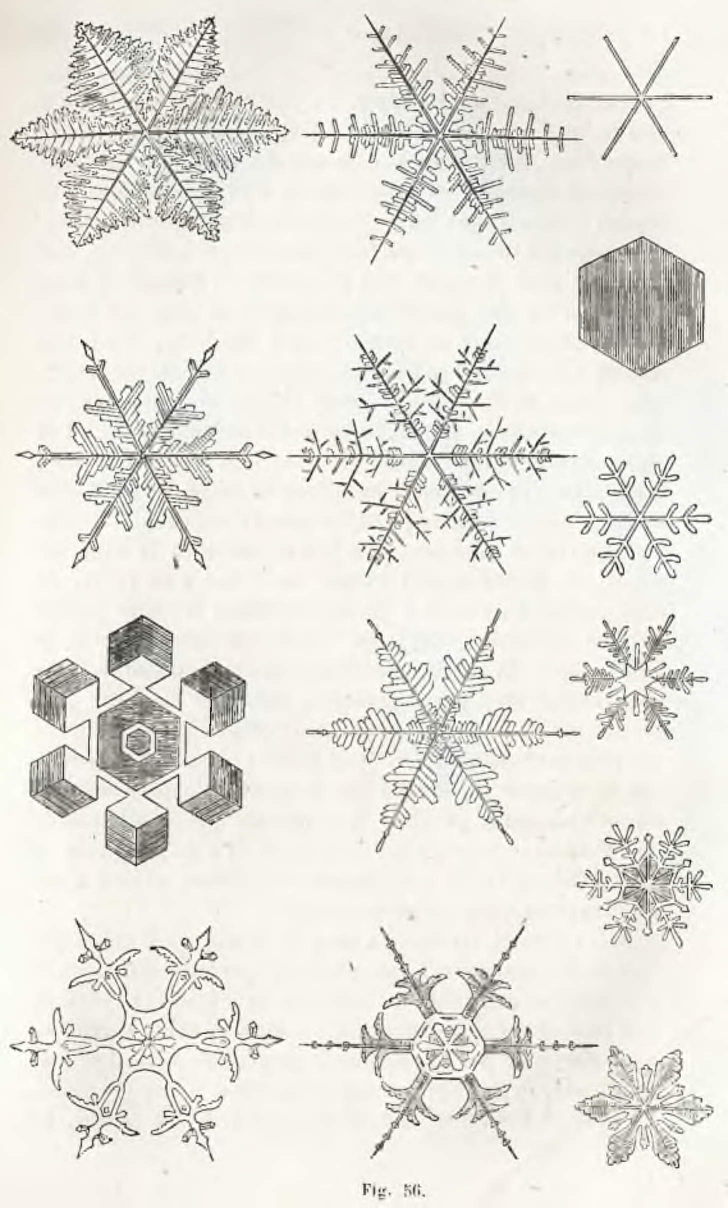
marquable de ces courants, et de beaucoup le plus important pour nous, c'est le Gulf-Stream, qui croise l'Atlantique, venant des régions équatoriales à travers le golfe du Mexique, qui lui donne son nom. Lorsqu'il quitte le détroit de la Floride, sa température est de 28 degrés; il suit la côte de l'Amérique jusqu'au cap Fear, s'élance à travers l'Atlantique dans la direction nord-est, et vient enfin lécher les côtes de l'Irlande, ainsi que la côte nord-ouest de presque toute l'Europe. Comme on doit s'y attendre, l'influence de cette masse d'eau chaude devient évidente d'elle-même dans nos hivers. Elle supprime entièrement la différence de température due à la différence de latitude entre le nord et le sud de la Grande-Bretagne. Si en janvier nous allons du canal de la Manche aux îles Shetland, nous trouverons partout la même température. La ligne isotherme court du nord au sud. La proximité de cette eau chaude fait aussi que le climat de l'Europe occidentale diffère totalement du climat des côtes opposées de l'Amérique. La rivière d'Hudson, par exemple, située sous la latitude de Rome, est prise pendant trois mois de l'année. Partons de Boston en janvier, faisons le tour de Saint-Jean de Terre-Neuve et allons jusqu'en Islande, nous rencontrerons partout la même température. Le port de Hammerfest tire sa très-grande importance du fait qu'il est libre de glace pendant toute l'année. Cela est dû au Gulf-Stream, qui tourne autour du cap du Nord, et modifie tellement le climat de ces régions, que sur quelques points, en avançant vers le nord, on arrive à des stations plus chaudes. Le contraste entre le nord de l'Europe et la côte orientale de l'Amérique, avait fait soupçonner à Halley que le pôle nord de la terre s'était déplacé; qu'il était situé primitivement près du détroit de Behring, et que le froid intense observé dans ces régions est réellement le froid de l'ancien pôle, qui ne s'est pas entièrement dissipé depuis que l'axe a changé de direction. Nous savons maintenant que le Gulf-Stream et la diffusion de la chaleur par les vents et les vapeurs sont les causes réelles de la douceur du climat européen.

L'Europe est donc le condenseur de l'Atlantique; de même que les montagnes sont les principaux condenseurs de l'Europe.

En outre, lorsqu'elles sont suffisamment élevées, la vapeur condensée descend sur elles, non plus sous forme liquide, mais sous forme solide. Prenons cette eau à son lieu d'origine, et suivons-la dans sa marche successive. Des nuages flottent dans l'air, et, parce qu'ils flottent dans l'air, on les suppose formés de vésicules aériennes ou de globules qui seraient non de petites sphères liquides et pleines, mais de petits ballons d'air à parois d'eau. D'éminents voyageurs disent qu'ils ont vu ces ballons, et leurs assertions ont droit au respect de tous. Il est certain, cependant, qu'à de grandes hauteurs les particules d'eau ont, dans ou après l'acte de leur précipitation, la propriété de se réunir pour former des ensembles de formes cristallines, mettant ainsi en jeu des forces que nous avons été habitués jusqu'ici à considérer comme moléculaires, et dont on ne saurait douer des vésicules aériennes.

La neige, parfaitement formée, n'est pas un agrégat irrégulier de particules de glace ; dans une atmosphère calme, les atomes aqueux s'arrangent de façon à former les figures les plus exquises. Vous avez vu ces fleurs à six pétales naître spontanément au sein d'un bloc de glace, lorsqu'un rayon de chaleur venait à traverser le bloc. Les cristaux de neige, formés dans une atmosphère calme, sont construits sur le même type ; les molécules s'arrangent pour former des étoiles hexagonales. D'un noyau central sortent six aiguilles formant deux à deux des angles de 60°. De ces aiguilles centrales sortent à droite et à gauche d'autres aiguilles plus petites traçant à leur tour avec une infaillible fidélité leur angle de 60° ; sur cette seconde série d'aiguillettes, d'autres encore plus petites s'embranchent de nouveau, toujours sous le même angle de 60°. Ces fleurs à six pétales prennent les formes les plus variées et les plus merveilleuses ; elles sont dessinées par la plus fine des gazes, et tout autour de leurs angles on voit quelquefois se fixer des rosettes de dimensions encore plus microscopiques. La beauté se superpose à la beauté, comme si la nature, une fois à la tâche, prenait plaisir à montrer, même dans la plus étroite des sphères, la toute-puissance de ses ressources[1].

[1] Voyez la figure 56, dans laquelle sont copiés quelques-uns des beaux dessins de M. Glaisher.


Fig. 56.

Ces fleurs de glace constituent nos montagnes de neige ; elles couvrent les hauteurs des Alpes, où leur frêle architecture est bientôt détruite par les accidents atmosphériques. Elles tombent chaque hiver, et disparaissent à chaque été, mais dans cette succession rhythmique, la compensation n'est pas parfaite. Au-dessous d'une certaine limite, la chaleur devient prédominante, et la neige qui tombe chaque hiver disparaît complétement. Au-dessus de cette ligne, le froid prédomine, la quantité de neige qui tombe est plus grande que la quantité de neige qui fond ; il y a chaque année un certain résidu. En hiver, les neiges atteignent les plaines ; en été, elles regagnent la *ligne des neiges*, cette limite où la neige qui tombe chaque hiver est tout entière consommée ou fondue, et au-dessus de laquelle s'étend la région des neiges perpétuelles. S'il était vrai, qu'au-dessus de cette ligne-limite, il y eût annuellement excès de neige, les montagnes se chargeraient d'un poids qui augmenterait chaque année. En supposant qu'en un point déterminé pris au-dessus de la ligne des neiges, la couche ajoutée chaque année soit d'un mètre, ce dépôt, ajouté sans cesse à lui-même pendant la courte période de l'ère chrétienne, formerait aujourd'hui une élévation de 1 860 mètres. Et si cette même accumulation, au lieu de commencer avec les temps historiques, remontait jusqu'aux âges géologiques, la hauteur de la neige empilée dépasserait tout ce que nous pouvons imaginer. Il est évident qu'aucune accumulation de ce genre n'a lieu, et que la quantité de neige des montagnes n'augmente pas dans la proportion que nous venons de dire. Pour une raison ou pour une autre, il n'est pas permis au soleil d'enlever l'océan à son bassin, et d'entasser ses eaux d'une manière permanente sur les montagnes.

Mais comment cet excès annuel de charge est-il enlevé aux épaules des montagnes ? Les neiges quelquefois se détachent, se précipitent en avalanches sur les pentes, et se fondent en eau dans l'air plus chaud des régions basses. Mais la chute violente en avalanches n'est pas leur seul mouvement ; elles descendent aussi en glissant, et par degrés presque insensibles le long des pentes. En outre, à mesure qu'une couche s'ajoute à une couche, les

portions plus profondes de la masse se compriment et se consolident ; l'air d'abord emprisonné dans les mailles de la neige, est chassé au dehors, et la masse comprimée prend de plus en plus le caractère de la glace. Vous savez combien deviennent adhérents les grains d'une boule de neige ; vous savez combien vous pourriez la rendre dure si vous cédiez à des inclinations méchantes. La boule de neige est de la glace qui commence ; augmentez la pression, et vous la convertissez réellement en glace. Mais même après qu'elle a atteint le degré de solidité qui permet de l'appeler glace, elle est encore apte à céder plus ou moins comme le fait la neige à la pression qu'on lui fera supporter. Par conséquent, lorsqu'une épaisseur suffisante de neige solidifiée s'est amassée sur la surface de la terre, les couches inférieures sont pressées violemment par le poids des couches supérieures, et si elles reposent sur une pente, elles céderont, principalement dans la direction de la pente, à l'effort qui les pousse, et tendront à descendre.

Ce mouvement se continue incessamment le long des pentes de chaque montagne chargée de neige, sur les monts Himalaya, sur les Andes, sur les Alpes, etc. ; mais à ce mouvement né de la faculté qu'a en elle-même la neige solidifiée de céder à la pression, s'ajoute le mouvement de glissement sur son lit incliné. Elle descend en masse sur la pente de la montagne ; émoussant les aspérités des roches, et polissant leurs surfaces dures. La couche inférieure de ce puissant polissoir est aussi creusée et sillonnée par les roches sur lesquelles elle passe ; mais à mesure que la masse compacte de neige glacée descend, elle entre dans une région plus chaude, elle est plus abondamment fondue, et quelquefois, avant d'avoir atteint la base de la pente, elle est entièrement tranchée ou anéantie par la fusion. Quelquefois, aussi, de larges et profondes vallées reçoivent la masse gelée ainsi poussée en bas. Après s'être consolidée encore davantage dans ces vallées, cette masse continue à descendre d'un pas lent mais mesurable, imitant dans tous ses mouvements le cours d'une rivière. La glace est ainsi amenée au-dessous des limites des neiges perpétuelles, jusqu'à ce qu'enfin la perte en bas égale et compense le gain en haut ; en ce point le glacier cesse. En deçà de la ligne de neige,

en été, nous avons de la *glace* ; au delà de la ligne de neige, en été comme en hiver, nous avons, à la surface, de la *neige*. La portion située au-dessous de la ligne de neige s'appelle un *glacier* ; celle qui est au-dessus est appelé le *nevé*. Le nevé est donc l'aliment du glacier.

Quelques vallées ainsi remplies peuvent se réunir en une vallée unique; les *glaciers tributaires* se soudent alors pour former un *glacier tronc*. La vallée principale et ses tributaires sont souvent sinueux, et les glaciers tributaires doivent changer de direction pour former le tronc. La largeur de la vallée change souvent aussi, et le glacier est forcé de se rétrécir dans des gorges étroites, pour s'élargir de nouveau après les avoir traversées ; le centre du glacier se meut plus vite que les côtés et la surface plus vite que le fond. Le point de mouvement plus rapide ou de maximum de vitesse suit la loi observée pour le point correspondant du cours des rivières, allant d'un côté à l'autre, quand le pli de la vallée change[1]. Sur la plupart des grands glaciers des Alpes, la vitesse au centre en été est de 66 centimètres par jour. Il est sur la Mer de glace, en face du Montenvert, des points où la progression diurne est de 60 centimètres en été et de 30 centimètres en hiver.

La faculté de se mouler elle-même sur le canal dans lequel elle se meut, a conduit des hommes éminents à admettre que la glace est visqueuse ; et les phénomènes semblent à première vue donner de la consistance à cette hypothèse. Le glacier s'élargit, se courbe, se rétrécit, et son centre se meut plus vite que ses côtés ; une masse visqueuse ferait indubitablement de même. Mais les expériences les plus délicates sur la propriété qu'aurait la glace de céder à la traction, de s'étendre comme la mélasse, le miel, ou le goudron, n'ont pas réussi à la montrer douée de cette faculté d'extension. Est-il donc une autre qualité physique à laquelle on puisse rapporter le pouvoir d'accommodation de la glace?

Abordons pas à pas ce sujet délicat. Nous savons que des vapeurs s'échappent continuellement de la surface libre d'un liquide; que les particules de la surface atteignent leur état de liberté ga-

[1] Pour les données sur lesquelles cette loi est fondée, voyez l'appendice de cette leçon.

zeuse plus tôt que les particules de l'intérieur. Or, il est naturel d'attendre que tout se passera de même à l'égard de la glace ; que lorsque la température d'une masse de glace s'élèvera uniformément, les particules les premières à atteindre leur liberté à l'état liquide seront celles de la surface ; car là elles sont entièrement en dehors, d'un côté, de l'action coercitive des particules environnantes. En supposant donc deux morceaux de glace à 0°, et entrant en fusion à la surface, à cette température ; qu'arrivera-t-il si nous plaçons les surfaces fondantes en contact l'une de l'autre? En agissant ainsi nous transportons virtuellement ces deux surfaces au centre de la glace, où le mouvement de chaque molécule est tout autour sous la dépendance coercitive des molécules voisines. Comme on devait naturellement s'y attendre, l'entrée en liberté par le passage à l'état liquide est empêchée en chacun des points où les deux surfaces se touchent, et les deux morceaux se congèlent ou se soudent. Faisons l'expérience : voici deux morceaux de glace que je viens de séparer l'un de l'autre, au moyen d'une scie ; je rapproche leurs surfaces planes ; une demi-minute de contact suffira ; elles sont maintenant congelées ensemble, et en prenant l'une d'elles, je puis les soulever toutes deux.

Tel est le fait sur lequel M. Faraday appela le premier l'attention, en juin 1850, et qui est maintenant connu sous le nom de *Régélation*. Un jour chaud d'été, je suis entré dans une boutique du Strand ; des fragments de glace étaient exposés dans un bassin sur la fenêtre ; et, avec la permission du marchand, prenant à la main et tenant suspendu le morceau le plus élevé, je m'en suis servi pour entraîner tous les autres morceaux hors du plat. Quoique le thermomètre en ce moment marquât 30°, les morceaux de glace s'étaient soudés à leurs points de jonction. Cet effet a lieu même au sein de l'eau chaude ; voici une cuvette d'eau aussi chaude que ma main peut la supporter ; j'y plonge ces deux morceaux de glace ; et je les tiens serrés pendant un moment ; ils sont maintenant gelés ensemble, nonobstant la présence du liquide chaud. Une jolie expérience de M. Faraday, consiste à placer un certain nombre de petits fragments de glace dans un vase plein d'eau, et

assez profond pour les faire flotter à sa surface. Lorsqu'un morceau arrive à en toucher un autre, ne fût-ce qu'en un seul point, la régélation se produit instantanément. On peut faire ainsi qu'une série de morceaux viennent à se toucher l'un l'autre, et dès qu'ils se sont une fois touchés, on peut prendre le dernier morceau de la bande et s'en servir pour traîner tous les autres à sa suite. Lorsque nous cherchons à courber deux morceaux ainsi unis vers leur point de jonction, les points gelés se séparent soudainement par fracture, mais au même moment le contact se rétablit sur d'autres points, et la régélation recommence. On peut ainsi faire rouler une roue de glace sur une surface de glace; les contacts sont à chaque instant rompus, avec un craquement, mais il s'en établit d'autres aussitôt par régélation. En vertu de cette propriété de la régélation, la glace devient apte à produire beaucoup des phénomènes qui sont habituellement attribués aux corps visqueux[1].

Voici, par exemple. une barre droite de glace : je puis, en la faisant passer successivement dans une série de moules de plus en plus courbes, l'amener enfin à l'état d'anneau semi-circulaire. La barre droite comprimée dans le moule courbe se brise d'abord, mais si l'on continue la pression, de nouvelles surfaces arrivent en contact, et la continuité de la masse est rétablie par régélation. Je prends une poignée de ces petits fragments de glace, et je les serre l'un contre l'autre, ils se gèlent à leurs points de contact, et maintenant ils ne forment plus qu'une seule masse. Quand on forme une boule de neige, ainsi que M. Faraday l'a fait remarquer, on fait l'application de ce même principe. Pour que la solidification ait lieu, la neige doit être à 0° et humide ; lorsqu'elle est au-dessous de 0° et sèche, elle se comporte comme du sable si on la presse. La traversée sur des ponts de neige dans les régions supérieures des glaciers de la Suisse devient possible par le seul fait de la régélation des grains de neige. En montant et marchant sur la masse avec précaution, on détermine la régéla-

[1] Voyez une note sur la régélation des granules de neige à l'appendice de cette leçon.

tion des grains de neige, la masse prend alors une rigidité qu'elle n'aurait jamais atteinte sans l'acte de la congélation. A ceux qui ne sont pas familiarisés avec ce genre de travail, le fait de franchir sur des ponts de neige, comme on le fait souvent, des crevasses de 30 mètres et plus de profondeur, doit apparaître tout à fait effrayant.

Si je continuais à comprimer cette masse de fragments de glace, je les amènerais à une proximité encore plus grande ; mais ma main est impuissante à les serrer assez étroitement. Je les place dans ce moule en buis, ayant la forme d'un cylindre creux, et posant au haut un disque plat de buis, j'introduis le cylindre et le disque entre les mâchoires d'une petite presse hydraulique et je comprime avec force la masse au sein du moule. Je fais cesser la pression et je renverse la masse sous vos yeux : elle est convertie en un gâteau compacte de glace. Je la place dans cette cavité lenticulaire et je la comprime de nouveau. Elle est naturellement écrasée par la pression ; mais de nouveaux contacts s'établissent, et vous voyez la masse transformée en une lentille de glace. Je mets la lentille dans cette cavité hémisphérique, H (fig. 57).

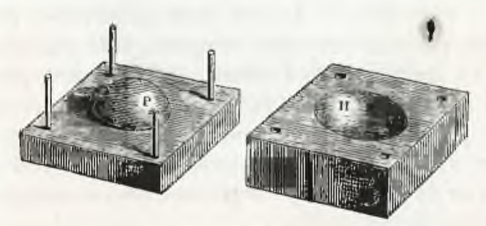


Fig. 57.

J'appuie sur elle une protubérance aussi hémisphérique, P, qui ne remplisse pas tout à fait la cavité. Je comprime la masse ; la glace, qui un moment auparavant était une lentille convexe, est forcée promptement de se mouler par compression dans l'espace compris entre les deux surfaces sphériques. Je dégage la glace du moule, et je vois apparaître la surface intérieure d'une coupe hémisphérique que je puis remplir de vin de Xérès frais, sans en perdre une goutte. Je racle avec

un ciseau une certaine quantité de glace de ce bloc; et plaçant cette masse spongieuse dans une cavité sphérique, C (fig. 58), je la comprime, et ajoute sans cesse de nouvelle glace

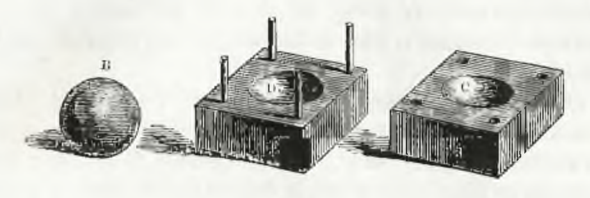


Fig. 58.

qui surplombe, et sur laquelle j'installe une seconde cavité renversée, D ; de telle sorte que la glace intérieure soit comprise entre deux demi-sphères. A mesure que je presse, la masse devient de plus en plus compacte. J'ajoute encore de la matière, et je presse de nouveau. A chacune de ces opérations, la masse devient plus dure, et voici enfin une boule de neige comme vous n'en avez jamais vu auparavant. C'est une sphère de glace dure et translucide.

Vous le voyez donc : de la glace brisée en morceaux peut par la pression redevenir une masse compacte, et la régélation, en soudant les surfaces qui se touchent, permet de faire prendre à la masse toutes les formes qu'on voudra. Si l'expérience en valait la peine, je me ferais fort de transformer ce bloc en *une corde de glace*, avec laquelle je ferais ensuite un nœud. Il n'est, en réalité, rien de plus facile que de produire des statuettes de glace dans des moules convenables.

Il est aisé de comprendre comment une substance ainsi douée peut passer, en se comprimant, à travers les gorges étroites des Alpes; s'infléchir pour s'ajuster à tous les plis des vallées, se prêter au mouvement différentiel de ses diverses parties, et, tout cela, sans présenter aucune trace sensible de viscosité. L'hypothèse de la viscosité, d'abord mise en avant par Mgr Rendu, développée plus tard avec une grande habileté par M. le professeur Forbes, rend compte certainement de la moitié des faits. Là où la pression est en jeu, la glace se comporte comme un corps vis-

queux; quand c'est la tension ~~ou la pression~~ qui agit, toute analogie avec un corps visqueux cesse aussitôt.

Je viens d'esquisser rapidement les phénomènes des glaciers existants, autant que l'exigeaient leurs rapports avec le sujet que nous traitons; mais l'explorateur scientifique des régions montagneuses rencontre des apparences qui ramènent son esprit à un état de choses très-différent de celui que nous observons maintenant. Les traces incontestables qu'ils ont laissées après eux montrent que de vastes glaciers ont autrefois existé en des lieux d'où ils ont disparu depuis de longs âges. Gravissez, par exemple, le glacier de l'Aar, dans les Alpes Bernoises, et contemplez-le à l'œuvre; voyez comment sur ses flancs les roches sont actuellement arrondies, polies, creusées par la glace en mouvement.

Et après avoir, par un exercice patient et multiplié, fait l'éducation de vos yeux et de votre jugement dans ces matières, descendez le glacier jusqu'à son extrémité, sans perdre un instant de vue les caractères évidents de son action. Après l'avoir quitté, continuez et descendez la vallée du Grimsel; vous voyez partout les mêmes caractères, sur lesquels il est impossible de se méprendre. Les roches qui s'élèvent du lit de la vallée sont arrondies comme des dos de cochon; ce sont les roches moutonnées de Charpentier et d'Agassiz; vous remarquez sur elles les cannelures plus larges creusées par la glace, et aussi les sillons plus petits tracés par les cailloux, sorte d'émeri adhérent à la surface inférieure des glaciers. Toutes les roches du Grimsel ont été ainsi rabotées de haut en bas. Descendez dans la vallée de Hasli, et examinez les flancs de la montagne à droite et à gauche: sans la clef que je crois vous avoir appris à manier, vous seriez dans un pays d'énigmes; mais avec cette clef tout est clair: vous voyez partout les cannelures et les rayures bien connues. Dans le fond de la vallée vous trouverez des amas de roches, ici entassées en forme de dôme, là polies d'une manière si lisse, que pour les gravir, même lorsque l'inclinaison est modérée, il faut y tailler des marches. Le long de la route qui conduit à Meyringen, et au delà, si tant est que vous veuilliez poursuivre vos recherches, vous verrez que ces mêmes témoignages abondent. Comme but

d'excursion préliminaire à la découverte des traces des anciens glaciers, on ne peut choisir de meilleur terrain que celui-là.

Ces mêmes évidences se retrouvent dans la vallée du Rhône; vous pouvez les suivre pas à pas à travers la vallée sur une longueur de 100 kilomètres, pour les perdre enfin dans le lac de Genève. Mais sur les flancs du Jura, au côté opposé du canton de Vaud, ces mêmes témoins se dressent de nouveau. Tout le long de ces pentes calcaires, vous rencontrez, semés çà et là, les boulders granitiques du mont Blanc. A droite et à gauche aussi de la grande vallée du Rhône, les vallées latérales proclament qu'elles ont été autrefois envahies par la glace. Sur les flancs italiens des Alpes, les reliques des glaciers sont, s'il est possible, plus étonnantes encore que sur le flanc nord. Quelque grandioses qu'apparaissent les glaciers actuels à ceux qui les explorent sur toute leur étendue, ils ne sont que de vrais pygmées en comparaison de leurs ancêtres.

Ce n'est pas seulement dans la Suisse ni dans le voisinage des glaciers existants qu'on retrouve les vestiges des glaces antiques; ils sont presque aussi visibles sur les collines de Cumberland que sur les Alpes.

Là où la roche nue a été exposée pendant des siècles à l'action de l'eau, les marques les plus fines ont disparu dans la plupart des cas, et les formes mamelonnées des roches sont les seuls témoins des anciens glaciers. Mais quand on enlève la terre qui les a protégés, les surfaces des roches se montrent souvent taillées comme par une pointe aiguë, et aussi unies que les surfaces de celles que les glaciers des Alpes creusent et polissent encore aujourd'hui.

Tout autour de Scawfell, les traces des anciennes glaces se dressent sous la forme à la fois de *roches moutonnées* et de *blocs perchés;* des faits nombreux prouvent jusqu'à l'évidence que Borrodale a été autrefois occupé par un glacier. Dans la Galle du Nord aussi, les anciens glaciers ont gravé si fortement leur empreinte sur le roc, que les âges qui se sont écoulés depuis n'ont pas suffi pour effacer même leurs traces superficielles. Partout, autour de Snowdon, ces témoignages surabondent. Sur la côte

sud-ouest de l'Irlande encore, les *reechs* de Magillicuddy, qui luttent dans les airs, pour les saisir et les condenser sur leurs crêtes froides, contre les vents humides de l'Atlantique ; la précipitation d'eau est abondante, et la pluie à Killarney semble être la loi de la nature. Dans ces régions humides, chaque rocher escarpé est couvert d'une riche végétation ; mais les vapeurs, qui maintenant descendent en pluie douce et fertilisante, tombaient autrefois en neige, matière première de nobles et antiques glaciers. La vallée Noire (*Black Valley*) était jadis remplie de la glace qui aplanissait les flancs de la montagne de Pourpre (*Purple Mountain*), en descendant lentement vers le lac Supérieur (*Upper Lake*). Le terrain occupé par ce lac était lui-même entièrement envahi par la glace, et chaque île qui maintenant émerge de sa surface était un dôme de glace. Les noms fantastiques que beaucoup de ces roches ont reçus ont été inspirés par les formes bizarres que leur avait fait prendre, en les sculptant, le puissant rabot qui passa jadis sur elles.

L'Amérique du Nord fut aussi une mer de glace. Mais l'observation de ce genre la plus remarquable a été faite par M. le docteur Hooker. Dans une incursion récente en Syrie, il a reconnu que les célèbres cèdres du Liban croissent sur des moraines d'anciens glaciers.

La détermination des conditions qui permettent la formation de ces vastes masses de glace a longtemps été un problème pour les physiciens, et la discussion attentive des solutions que ce problème a reçues successivement est vraiment instructive. Je n'ai pas de nouvelle hypothèse à proposer, mais il semble possible de donner à nos recherches une direction plus vraie, un but mieux défini. L'objet de tous les auteurs qui, à ma connaissance, ont écrit sur ce sujet a été de découvrir le moyen d'obtenir le *froid*. Plusieurs hommes éminents ont pensé, quelques-uns pensent encore que l'abaissement de la température, à l'époque des glaciers, était dû à une diminution passagère de la radiation solaire; d'autres ont imaginé que, dans son mouvement à travers l'espace, notre système peut avoir traversé des régions de basse température, et que les anciens glaciers se seraient formés

pendant le passage à travers ces régions plus froides. D'autres savants, un peu plus dans le vrai, ont demandé la température plus basse dont ils avaient besoin à une distribution différente des continents et des eaux. Si je comprends bien les écrits des hommes éminents qui ont proposé et soutenu ces diverses hypothèses, plusieurs d'entre eux semblent n'avoir tenu aucun compte de ce fait, que l'énorme extension des glaciers dans les âges passés démontre avec une rigueur tout à fait égale et l'action de la chaleur et l'action du froid.

Le froid ne produit pas de glaciers. Vous pouvez avoir ici, à Londres, pendant un hiver tout entier, le vent nord-est le plus piquant et le plus froid, sans qu'il tombe un seul flocon de neige. Pour se produire, la neige a besoin de sa matière première, et cette matière première, la vapeur aqueuse de l'air, est le produit direct de la chaleur. Donnons une autre forme à l'énoncé du problème des glaciers. La chaleur latente de la vapeur aqueuse, à la température de sa production sous les tropiques, est d'environ 555 degrés, car cette chaleur latente croît à mesure que la température de l'évaporation descend. Un kilogramme d'eau vaporisée sous l'équateur a donc absorbé 1 110 fois la quantité de chaleur qui aurait élevé d'un degré la température d'un kilogramme d'eau liquide. Mais la quantité de chaleur qui aurait élevé d'un degré un kilogramme d'eau élèverait de 20 degrés la température d'un kilogramme de fonte de fer; d'où il suit que pour convertir simplement un kilogramme d'eau de l'Océan équatorial en vapeur, il faudrait une quantité de chaleur suffisante pour élever de 2 220 degrés la température d'un kilogramme de fonte de fer. Mais le point de fusion de la fonte de fer est à 1 110° C.; donc, pour chaque kilogramme de vapeur produite, il a été dépensé par le soleil une quantité de chaleur suffisante pour élever 5 kilogrammes de fonte de fer à son point de fusion. Figurez-vous donc chacun des anciens glaciers avec sa masse de glace quintuplée; supposez que la place de cette masse, ainsi quintuplée, soit prise par une masse égale de fonte de fer portée à la chaleur blanche de fusion, et vous aurez l'expression exacte de la quantité de chaleur solaire engagée

dans la production des anciens glaciers. Substituez le fer chaud à la glace froide ; vous aurez immédiatement l'idée et la mesure de la température très-élevée de l'époque glaciaire, et vous en verrez sortir très-probablement le renversement complet des hypothèses que nous avons énumérées plus haut.

Il est parfaitement manifeste qu'en affaiblissant l'action du soleil, soit par une diminution d'émission, soit en faisant traverser au système solaire tout entier un espace de basse température, nous détruisions les glaciers dans leur source. De vastes masses de montagnes de glace nécessitent infailliblement des masses adéquates de vapeur atmosphérique, et, de la part du soleil, une énergie grande dans la même proportion. Quand, en possession d'un appareil distillatoire, vous voudrez augmenter la quantité de liquide distillée, vous n'essayerez assurément pas d'obtenir la basse température nécessaire à la condensation du liquide en enlevant le feu de dessous votre chaudière ; or, si je comprends bien la chose, c'est ce qui a été fait par les physiciens qui ont voulu produire les anciens glaciers par la diminution de la chaleur du soleil. Il est tout à fait évident que la chose la plus indispensable pour produire les glaciers est un *condenseur perfectionné;* nous n'avons pas un iota à perdre de l'action solaire ; si nous avons besoin de quelque chose, c'est de plus de vapeur, et surtout d'un condenseur assez puissant pour que cette vapeur, au lieu de tomber en averses liquides sur la terre, soit assez abaissée dans sa température pour descendre en neige. Le problème ainsi posé est, je pense, aussi près que possible de sa solution.

APPENDICE A LA LEÇON VI

EXTRAIT D'UN DISCOURS SUR LA MER DE GLACE[1]

Une partie de la série d'observations faites sur la mer de glace de Chamouni, durant les mois de juillet et d'août de l'année dernière, a été le point de départ de ce discours.

La loi d'abord établie par M. Agassiz et par M. le professeur J. D. Forbes, que les portions centrales d'un glacier se meuvent plus vite que les côtés, a été amplement démontrée par la manière dont se sont comportées les lignes de poteaux placés de distance en distance transversalement à la mer de glace et aux tributaires du glacier. Les portions de la mer de glace dérivées de ces tributaires sont faciles à reconnaître sur toute la longueur du glacier par la présence des moraines. Ainsi, par exemple, la portion du glacier tronc dérivée du glacier du Géant se distingue, au premier coup d'œil, de la portion dérivée des autres tributaires, par l'absence de débris de moraines à sa surface. La bande des boues forme une limite très-distincte entre les deux portions.

M. le professeur Forbes a appelé l'attention sur ce fait, que le côté est du glacier, en particulier, est *excessivement crevassé*; il explique ces crevasses en admettant que le glacier du Géant se meut le plus vite, et que dans son effort pour entraîner ses compagnons plus paresseux, il les tiraille, les déchire, et produit ainsi les fissures et les dislocations qui rendent le côté est du glacier si remarquable. L'ora-

[1] Prononcé à l'Institution royale de la Grande-Bretagne, le vendredi 8 juin 1858, par sir John Tyndall, F. R. S.

teur dit qu'il ne faut pas accorder trop de valeur à cette explication. C'était une de ces hypothèses mises sans cesse en avant par les hommes de science dans le cours de leurs recherches, et dont la réalisation ou la non-réalisation ne peut affecter en rien le mérite de celui qui l'émet.

En vérité, le mérite de M. Forbes repose sur des fondements bien plus solides; plus on compare ses travaux à ceux d'autres observateurs, plus la prééminence relative de son intelligence ressort et resplendit. Ce ne serait pas assez pour l'orateur que d'avoir déclaré que le livre du professeur Forbes est le meilleur livre qui ait été écrit sur le sujet. Les qualités de son esprit, les preuves d'instruction physique profonde dont cet excellent livre est plein sont telles, que dans l'estime au moins des physiciens investigateurs, il vaut à lui seul les autres traités des glaciers pris ensemble[1]. Ayant ainsi proclamé son mérite, faisons la libre et franche comparaison de ses théories avec les faits.

Pour savoir si le glacier du Géant se meut plus vite que ses compagnons, cinq lignes différentes de poteaux ont été dressés en travers de la mer de glace, dans le voisinage du Montenvert, et chacune de ces lignes a montré que le point du mouvement le plus rapide n'est pas du tout sur le glacier du Géant; mais qu'il s'était déplacé de manière à se rapprocher sensiblement du côté est du glacier. Ces mesures prouvent que la proposition ci-dessus énoncée n'est pas soutenable; mais la déviation du point de mouvement plus rapide et son éloignement du centre du glacier seront sans doute considérés par M. le professeur Forbes, comme étant d'une bien plus grande importance pour sa théorie. A l'endroit où ces mesures ont été prises, le glacier tourne sa convexité vers le côté est de la vallée, et sa concavité vers le côté de Montenvert. Exagérons l'analogie établie par M. Forbes dans son explication entre le glacier du Géant et une rivière puissante à pente rapide. Cherchons comment devrait se comporter une rivière forcée de décrire une courbe semblable à celle que le glacier dessine.

[1] Depuis que ce qui précède a été écrit, j'ai publié mes *Glaciers des Alpes*, et, presque aussitôt après leur apparition, M. le docteur Forbes a répandu à un très-grand nombre d'exemplaires une *Réplique* aux passages de mon livre qui faisaient allusion aux travaux de Mgr Rendu. J'ai attendu plusieurs années avant de répondre à mon critique si distingué, non que je fusse impuissant à le faire, mais parce que j'ai pensé et que je pense encore que, du moins dans de certaines limites, il faut mieux rester victime d'un malentendu que de transformer le champ de la science en une arène de controverse purement personnelle.

Le point de mouvement plus rapide devrait indubitablement se trouver à partir du centre du courant, du côté vers lequel il tourne sa convexité. Est-ce ce qui arrive dans le cas du glacier? S'il en était ainsi, le déplacement du point de plus grande vitesse du mouvement devrait se faire du côté ouest de la vallée, quand la courbure du glacier change de manière à tourner sa convexité du côté ouest. Il existe un changement de courbure de ce genre en face des passages appelés *les Ponts*, et c'est précisément en ce point qu'on a mis à l'épreuve l'opinion que nous venons d'énoncer. Il fut bientôt devenu certain que là le point de mouvement le plus rapide, se trouvait de l'autre côté de l'axe, comparativement avec ce qui avait été observé plus bas. Mais pour donner au résultat de l'observation une exactitude numérique rigoureuse, des poteaux furent fixés à une distance déterminée du bord ouest du glacier et d'autres à la même distance du bord est. Les vitesses de ces poteaux furent comparées deux à deux, en prenant soin de comparer toujours un poteau du côté ouest avec le poteau correspondant placé à la même distance du côté est. Les résultats des mesures prises sont données en pouces dans le tableau suivant :

1re paire.	2e paire.	3e paire.	4e paire.	5e paire.
Ouest 15	Ouest. 17 $\frac{1}{4}$	Ouest. 22 $\frac{1}{2}$	Ouest. 25 $\frac{3}{4}$	Ouest. 25 $\frac{3}{4}$
Est... 12 $\frac{1}{2}$	Est... 15 $\frac{1}{4}$	Est... 14 $\frac{1}{2}$	Est... 18 $\frac{1}{4}$	Est... 19 $\frac{1}{2}$

On voit que dans chaque cas le poteau ouest se meut plus rapidement que son compagnon du bord est; mettant ainsi hors de doute qu'à l'opposé des Ponts, c'est le côté ouest de la Mer de glace qui se meut le plus vite, résultat précisément inverse de ce qu'on observait là où la courbure de la vallée était de sens contraire. Mais on peut soumettre à une autre épreuve l'explication que nous proposons. Entre les Ponts et le promontoire de Trélaporte, le glacier passe par un point de flexion contraire ; la convexité, d'abord opposée à Trélaporte, se tourne alors vers la base de l'aiguille du Moine, située au côté est de la vallée. Une série de poteaux fut placée là, en travers du glacier, et les vitesses des poteaux dressés à des distances déterminées du côté ouest furent comparés comme d'abord avec celles des poteaux dressés aux mêmes distances du côté est. La table suivante donne le résultat de ces mesures ; les nombres sont toujours exprimés en pouces :

1re paire,	2e paire.	3e paire.
uest. 12 $\frac{3}{4}$	Ouest. 15	Ouest. 17 $\frac{1}{4}$
Est... 14 $\frac{3}{4}$	Est... 17 $\frac{1}{2}$	Est... 19

Nous trouvons ici que toujours les poteaux *est* se sont mus plus

vite que leurs compagnons. Le point du mouvement maximum avait donc une fois de plus croisé l'axe du glacier, en passant sur le côté *est*.

En déterminant les points du mouvement maximum sur un grand nombre de sections transversales de la Mer de glace, et les unissant par une ligne continue nous obtenons le *lieu*, ou la courbe décrite par le point de plus grande vitesse. La figure 59 est un dessin de la Mer de glace ; la ligne ponctuée est la ligne médiane ou l'axe du glacier ; la ligne continue, qui croise l'axe du glacier aux points A A, est le lieu des points de mouvement plus rapide. C'est une courbe plus profondément sinueuse que la vallée elle-même, et elle croise la ligne centrale de la vallée à chaque point de courbure contraire.

Fig. 59.

L'orateur appelle l'attention sur ce fait que la position des villes sur le bord des rivières est habituellement sur le côté de la convexité du courant, où la vitesse plus grande de l'eau rend sa stagnation impossible. La Tamise est dans ce cas, et la même loi qui règle son cours, qui détermine la position des villes sur ses bords, est actuellement à l'œuvre avec une silencieuse énergie dans les glaciers des Alpes.

L'orateur passe à une autre particularité du mouvement des glaciers.

Avant qu'on eût fait aucune observation sur ce sujet, M. Forbes avait conjecturé que les portions du glacier les plus voisines du lit étaient retardées par le frottement exercé contre ce lit.

Ses prévisions furent confirmées plus tard par ses propres observations et par celles de M. Martins. Cependant l'état imparfait de nos connaissances rendait une confirmation ultérieure de ce fait grandement désirable. Une circonstance bien rare, un précipice de glace, le flanc presque vertical du glacier du Géant, en face et près de Tacul, s'offrait pour soumettre de nouveau la question à l'épreuve. Le précipice a près de 50 mètres de hauteur. Au haut et près du fond, des poteaux furent plantés, et en taillant des marches dans la glace, l'orateur réussit à fixer un dernier poteau en face du précipice, en un point situé à 15 mètres environ au-dessus de la base. Après un laps de temps suffisant, on mesure la marche en avant des poteaux ; ramenées au déplacement d'un jour, ces marches sont :

Poteau du haut.	6,00	pouces.
Poteau du milieu.	4,59	»
Poteau du bas	2,56	»

Nous voyons ainsi que le poteau du sommet a deux fois la vitesse du poteau du fond, et que la vitesse du poteau du milieu est moyenne entre les deux autres. Mais l'accroissement de vitesse, à mesure qu'on s'élève, n'est pas proportionnelle à la distance au fond ; elle croît dans une proportion plus rapide. A une hauteur de 33 mètres au-dessus du fond, la vitesse, sans aucun doute, ne différerait pas d'une manière sensible de la vitesse à la surface. Des mesures prises sur une pente escarpée du voisinage l'ont suffisamment prouvé. La validité des raisons par lesquelles M. Forbes explique la verticalité continue des parois des crevasses transversales ressort ainsi parfaitement. Il est très-vrai que la comparaison des faits avec ses prévisions et ses raisonnements met pleinement en évidence leur sagacité et leur vérité.

La vue la plus imposante de la Mer de glace et de ses tributaires est celle que l'on a d'un point situé au-dessus d'une fente remarquable dans la chaîne de montagnes, au-dessous de l'aiguille de Charmoz. Elle doit nécessairement attirer l'attention de tout observateur debout sur le Montenvert. Ce point, marqué G sur une carte de M. Forbes, l'orateur a réussi à l'atteindre. Un professeur de Tubingue visita une fois les glaciers de la Suisse, et voyant ces masses, en apparence si rigides, renfermées dans des vallées sinueuses, il écrivit, de retour chez lui, un livre dans lequel il niait carrément la possibilité de tout mouvement de la glace des glaciers.

Une vue prise du point dont nous parlons maintenant l'aurait certainement confirmé dans son opinion ; et dans le fait, rien n'est mieux calculé pour produire dans l'esprit une impression profonde de la grandeur des forces en jeu dans la nature, que la pression énorme subie par les glaciers tributaires de la Mer de glace, dans leur passage à travers le col étroit de la vallée à Trélaporte.

Citons quelques nombres. Avant sa jonction avec ses compagnons, le glacier du Géant mesure 1 154 mètres de largeur. Avant d'avoir subi l'influence de la poussée du Talèfre, le glacier de Léchaud a une largeur de 825 mètres, tandis que la largeur de la branche du Talèfre, mesurée à la base de la cascade, avant qu'il se joigne au Léchaud, est approximativement de 638 mètres. La somme de ces largeurs est de 2 597 mètres. A Trélaporte, ces trois branches sont forcées de franchir une gorge de 893 mètres de largeur, avec une vitesse centrale de 50 centimètres par jour ! Le résultat sera plus étonnant encore, si

nous fixons notre attention sur l'un des glaciers tributaires, le glacier de Léchaud. Avant sa jonction avec le Talèfre, sa largeur est de 57 $\frac{1}{2}$ chaînes anglaises. A Trélaporte, cette large rivière de glace est comprimée et réduite à une largeur de moins de 4 chaînes, c'est-à-dire au dixième environ de la largeur horizontale primitive.

D'où dérive la force qui pousse le glacier à travers la gorge? L'orateur croit que ce doit être une pression s'exerçant par derrière. D'autres faits encore l'amènent à penser que le glacier du Géant est sur toute sa longueur dans un état de compression longitudinale puissante. Si, prenant une série de points le long de l'axe du glacier, on constatait que dans la descente du glacier ces points restent parfaitement à la même distance, il ne saurait y avoir de compression longitudinale. La signification mécanique de ce mot compression, appliquée à une substance capable de céder, comme la glace, doit être que les points en arrière gagnent incessamment du terrain sur ceux qui sont en avant, et s'en rapprochent. L'orateur était particulièrement désireux de soumettre à l'épreuve des faits cette idée, que des considérations *à priori* lui avaient suggérée. Il fixa donc la position de trois points, A, B, C, sur l'axe du glacier du Géant, A étant le plus haut en remontant le glacier. La distance entre A et B était de 544 mètres, et celle entre B et C de 487 mètres. Mesurées au théodolite, les vitesses diurnes de ces trois points furent :

A.	20,55 pouces.
B.	15,45 »
C.	12,75 »

Les prévisions sont donc confirmées par les faits. Les points en arrière se rapprochent incessamment des points en avant, et cela d'une quantité suffisante pour raccourcir de 8 pouces en un jour un tronçon de glacier mesurant 1 000 mètres de longueur. Si la proportion du rapprochement était la même dans toutes les saisons, le raccourcissement total des tronçons serait de 80 mètres dans une année. Rapproché de la compacité de la glace et de la grande uniformité de largeur de la vallée qu'elle remplit, ce résultat ne peut pas manquer d'exciter notre surprise ; la force énorme qu'il met en évidence est, dans l'opinion de l'orateur, la cause principale qui force le glacier à passer à travers les mâchoires de l'étau de granit de Trélaporte.

En vertu de quelle qualité donc, la glace peut-elle se courber, se comprimer, et changer de forme de la manière indiquée par les observations précédentes? La seule théorie digne d'une attention sérieuse,

au moment actuel, est celle de M. le professeur Forbes, qui fait dépendre ces effets de la viscosité de la glace. L'orateur n'accepte pas cette théorie, parce que le terme de viscosité lui paraît tout à fait inacceptable quand il s'agit de la constitution physique de la glace des glaciers. Il a déjà moulé de la glace en coupes, il l'a courbée en anneaux, il lui a fait prendre une grande variété de formes par une pression artificielle, et il se fait fort de mouler en statuette le bloc compacte e informe de glace de Norvége placé sur la table; mais le mot viscosité est-il le terme propre à exprimer le double effet de broiement et de régélation, qui détermine la malléabilité ou la ductilité de la glace? Il ne le pense pas : une masse de glace à zéro est très-facile à briser en morceaux : mais sa cassure est aussi nettement définie et aussi acérée que celle d'une masse de verre. Il n'y a là aucun indice sensible de viscosité.

Le caractère essentiel de la viscosité est l'aptitude à céder à une forte *traction;* elle exige que le tissu de la substance, après qu'elle a cédé à la pression, soit dans un état d'équilibre stable, de sorte qu'elle n'ait aucune tendance à revenir à la forme première. Toutes les substances choisies par M. le professeur Forbes, pour donner une idée de la constitution physique d'un glacier possèdent dans un degré vraiment éminent la faculté d'être étirées. Mais on a objecté, non sans raison, que nous ne sommes pas en droit de conclure à l'absence de viscosité dans la glace, du fait que les morceaux de glace que nous manions n'en manifestent pas; pas plus que nous ne pourrions dire de la glace qu'elle n'est pas bleue parce que ses petits fragments sont tout à fait incolores. Pour résoudre la question de viscosité, il faut donc en appeler au glacier lui-même. Faisons-le. Premièrement, on a déjà mis en avant l'analogie entre le mouvement d'un glacier à travers une vallée tortueuse et le mouvement d'une rivière dans un canal sinueux. Mais l'analogie fait défaut par une particularité importante : la rivière, et plus encore un flot de mélasse, de miel, de goudron ou de caoutchouc fondu, décrit toutes ses courbes sans solution de continuité. La masse visqueuse *s'étire*, tandis que la masse de glace se *rompt*, et le *crevassement excessif*, signalé par M. le professeur Forbes, est la conséquence de la rupture. On a mis en avant, en second lieu, la pente inclinée de la Mer de glace et de ses tributaires, et l'on a noté avec soin le fait que les changements d'inclinaison sont accompagnés de fentes transversales. Chaque pèlerin des Alpes a remarqué la dislocation et la confusion extrême produites par la chute de la Mer de glace à partir du *Chapeau*. Ce même état de choses se retrouve

dans la cascade de glace du Talèfre. En descendant du *Jardin*, au point où la chute commence, il se produit transversalement des crevasses énormes, qui bientôt se succèdent si rapidement, qu'elles réduisent la masse entière du glacier à n'être plus qu'un amas de simples plaques ou coins, que l'excursioniste ne franchit qu'avec des précautions inouïes et presque en rampant. Ces plaques et coins sont quelquefois courbés et contournés par l'action de pressions latérales, et des forces tourbillonnantes ont tellement agi sur certains points, qu'elles ont fait tourner de 00 degrés de grandes masses pyramidales, amenant à angle droit l'une par rapport à l'autre des surfaces contiguës dans la position normale. La glace commence ensuite à tomber, et les portions exposées à la vue deviennent un assemblage fantastique de boulders, de clochetons, de tourelles de glace, quelquefois debout, souvent renversés, tombant par intervalles avec le fracas du tonnerre, et réduisant en poussière les rochers de glace sur lesquels ils tombent. La descente de la glace à travers ce défilé a été invoquée en preuve de sa viscosité ; or la description que nous venons d'en faire ne s'accorde pas, il nous semble, avec l'idée d'une substance visqueuse.

Mais la preuve véritable de la non-viscosité de la substance doit être cherchée aux points où le changement d'inclinaison est très-petit. Presque à l'opposé de l'Angle, la pente varie de 4 à 9 degrés, et la conséquence de cette variation est un système de fissures transversales, qui rendent le glacier parfaitement infranchissable. Plus loin, au haut du glacier, des crevasses transversales sont déterminées par une pente de 3 à 5 degrés. Cette pente est représentée figure 60 ; la courbure a

B

Fig. 60.

lieu au point B ; elle est à peine perceptible, et cependant le glacier est incapable de la franchir sans se rompre transversalement. Troisièmement, les crevasses sont dues à un état de tension dont la glace se soulage en se rompant ; la quantité dont elles s'élargissent peut être prise pour mesure de la somme de soulagement demandée par la glace. La soudaineté de leur formation, la lenteur avec laquelle elles s'élargissent, sont l'une et l'autre une preuve de la non-viscosité de la glace, car si la glace était capable de s'étirer, même de la petite quantité dont les crevasses s'élargissent, leur formation ne serait nullement nécessaire.

En outre, on sait que les crevasses marginales d'un glacier sont la conséquence de l'écoulement plus rapide de ses parties centrales, qui amène les côtés à un état de tension dont ils se soulagent en se rompant. Il est d'ailleurs aisé de calculer la quantité d'étirement exigée par la glace pour qu'elle puisse se prêter à l'écoulement plus rapide de son centre. Prenez le cas d'un glacier large d'un kilomètre. Un élément plan ou tranche transversale d'un semblable glacier, prend en vingt-quatre heures une forme courbée. L'extrémité de la tranche se meut un peu, mais le centre se meut davantage. Admettons que la flèche de la courbe formée par la tranche en vingt-quatre heures soit de 33 centimètres, ce qui est une belle moyenne. Ayant la corde de cet arc et sa flèche, nous pouvons calculer sa longueur. Dans le cas de la Mer de glace, qui est large d'environ un kilomètre, la quantité d'étirement demandée serait d'environ 3 centimètres en vingt-quatre heures. Assurément, si le glacier possédait une propriété qui pût avec quelque convenance être appelée viscosité, il devrait pouvoir répondre à cette exigence si modérée ; mais il en est absolument incapable ; au lieu de s'étirer comme un corps visqueux, pour obéir à cette tension, il se brise comme un corps éminemment fragile, et les crevasses marginales sont la conséquence de cette rupture. On pourrait objecter qu'il n'est pas loyal de distribuer la tension sur la longueur entière de la courbe ; mais réduisez la distance autant que vous voudrez, il n'en reste pas moins un résidu qui suffira à prouver la non-viscosité de la glace.

En résumé donc, deux classes de faits se présentent à celui qui étudie les glaciers : une classe de fait en harmonie avec l'idée de viscosité, et une autre qui lui est nettement opposée. Quand la pression seule est en jeu, tout se passe comme si la viscosité était réelle ; quand c'est la tension ou traction qui agit, toute trace de viscosité disparaît. Mais les deux ordres de faits se concilient sans peine dans l'hypothèse, ou mieux dans cette vérité expérimentale, que la fragilité de la glace et son pouvoir de régélation rendent possible pour elle tout changement de forme, sans préjudice de sa continuité.

NOTE SUR LA RÉGÉLATION DES GRANULES DE NEIGE[1]

Ce matin, 21 mars 1862, j'ai remarqué un cas extrêmement intéressant de régélation. Une couche de neige de 1 à 2 pouces d'épais-

[1] *Phil. Mag.*, 1862, vol. XXIII, p. 312.

sœur est tombée sur le toit de verre d'une petite serre, ayant une porte de communication avec la maison dont elle fait partie. L'air, légèrement chauffé, agissant intérieurement sur les vitres, a fait fondre la neige en contact immédiat avec le verre, et la conséquence de cette fusion a été que la couche entière a glissé doucement le long des châssis. Comme la pente du toit est très-faible, la progression de la neige était très-lente; et, lorsque la couche a dépassé le bord du toit, elle n'est pas tombée: elle a plié comme un corps flexible, pour rester pendante au-dessus du bord du toit sur une hauteur de 5 à 6 centimètres. La couche avait cessé d'être continue; elle était comme partagée en espaces rectangulaires par les montants longitudinaux et inclinés du châssis. En outre, comme une moitié du toit était plus chaude que l'autre, la couche s'était subdivisée en bandes qui avaient marché avec des vitesses différentes, et surplombaient le toit de quantités inégales. Les positions en surplomb étaient, sur quelques points, visiblement courbées en dedans.

M. Faraday a montré que lorsque de petits fragments de glace flottent sur l'eau, les morceaux qui arrivent à se toucher se soudent instantanément au point de contact; et que lorsqu'une série de morceaux se sont ainsi unis de manière à former la roue, on peut, en tirant sur le dernier morceau, entraîner tous les autres à sa suite. Ce même soudage a dû se produire entre les particules de neige dont il vient d'être question, et qui flottaient sur l'eau de liquéfaction à la surface du verre. M. Faraday a prouvé, en outre, que lorsque deux fragments de glace sont ainsi unis, ils tournent autour du point de contact comme autour d'une charnière, quand on essaye de les séparer l'un de l'autre par une poussée latérale; chaque fragment tourne en réalité autour de son voisin comme une roue, et chaque rupture est immédiatement suivie d'une adhérence nouvelle par régélation.

La faculté de se mouvoir, mise ainsi en évidence par l'expérience, rend compte, pour la neige en question, de la possibilité de se plier de la manière observée. Les granules les plus bas, lorsque l'appui du toit leur manque, roulent sur les plus hauts sans solution de continuité, et la couche de neige peut ainsi se courber comme si elle était visqueuse. Le plissement, enfin, était évidemment dû à une contraction de la surface inférieure de la couche, produite sans doute par l'accommodation des granules les uns aux autres, à mesure qu'ils diminuaient lentement de volume.

LEÇON VII

(6 MARS, 1862)

Conduction, une transmission du mouvement.— Bons conducteurs et mauvais conducteurs. — Conductibilité des métaux pour la chaleur : rapport de la conductibilité de la chaleur à celle de l'électricité. — Influence de la température sur la conduction de l'électricité. — Influence de la constitution moléculaire sur la conduction de la chaleur. — Rapport de la chaleur spécifique à la conduction. — Philosophie des habits. — Expériences de Rumford. — Influence de la texture mécanique sur la conduction. — Incrustation des chaudières. — La lampe de sûreté. — Conductibilité des liquides et des gaz : expériences de Rumford et de Despretz. — Effet réfrigérant du gaz hydrogène. — Expériences de Magnus sur la conductibilité des gaz.

Je pense que nous sommes maintenant assez familiarisés avec notre sujet pour distinguer entre les mouvements sensibles produits par la chaleur, et la chaleur elle-même. La chaleur n'est pas le choc des vents ; elle n'est ni le tremblement de la flamme, ni l'ébullition de l'eau, ni l'élévation d'une colonne thermométrique, ni le mouvement qui anime la vapeur lorsqu'elle s'élance de la chaudière où elle a été comprimée. Toutes ces choses sont des mouvements mécaniques dans lesquels le mouvement de la chaleur peut être converti ; mais la chaleur elle-même est un mouvement *moléculaire*, c'est une oscillation des dernières particules. Or ces particules, lorsqu'elles sont en groupes serrés, ne peuvent osciller sans que le mouvement se communique de l'une à l'autre ; et c'est à cette propagation du mouvement de la chaleur à travers la matière ordinaire, que nous devons consacrer aujourd'hui notre attention.

Voici un pique-feu qui me donne à peine la conscience de sa température ; je le sens comme un corps dur et pesant, qui ne m'échauffe ni ne me refroidit ; il a été devant le feu, mais le mouvement de ses particules au moment présent se trouve par hasard être le même que celui qui anime mes nerfs ; il n'y a entre lui et ma main ni cession ni soustraction ; la température du pique-feu, d'une part, et mes sensations, de l'autre, restent par conséquent sans variation. Mais je porte le bout de la barre dans le feu ; elle s'échauffe ; les particules en contact avec le feu sont amenées à un état d'oscillation plus intense ; les atomes en branle poussent leurs voisins ; ceux-ci, à leur tour, poussent les atomes suivants ; et il en résulte une musique moléculaire qui retentit le long de la barre. Le mouvement, dans cet exemple, est communiqué de particule à particule dans le pique-feu, et finit par apparaître à son extrémité la plus éloignée. Si maintenant je le saisis, son mouvement se communique à mes nerfs et produit de la souffrance ; la barre est ce que nous appelons chaude, et ma main, dans le langage populaire, est brûlée. Nous avons déjà défini la convection comme le transport de la chaleur par masses sensibles d'un lieu à un autre ; mais ce transport moléculaire, qui consiste en ce que chaque *atome* reçoit le mouvement de ses voisins et le transmet à d'autres, s'appelle la *conduction* de la chaleur.

Mettons d'abord en évidence par quelques exemples familiers cette propriété de la chaleur. Je prends un bassin plein d'eau chaude, et dans l'eau je place ce cylindre de fer de 2 centimètres

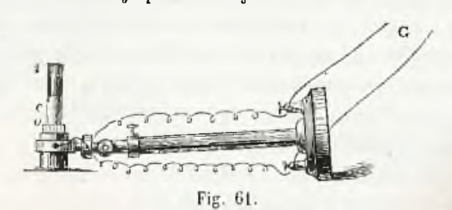


Fig. 61.

et demi de diamètre, de 5 centimètres de hauteur ; ce cylindre doit être ma source de chaleur. Je pose ma pile électrique, *o* (fig. 61), ainsi à plat, avec sa face nue tournée en haut, et sur

cette face je dresse un cylindre de cuivre, c, qui est actuellement à la température de cette salle. Nous n'observons pas de déviation du galvanomètre. Je place maintenant mon cylindre chaud, i, après l'avoir essuyé, sur le cylindre froid porté par la pile. Le cylindre supérieur n'a guère que la chaleur du sang ; et, vous le voyez, j'ai à peine eu le temps de faire cette remarque, que déjà l'aiguille s'est enfuie, indiquant que la chaleur a atteint la face de la pile. Ainsi le mouvement moléculaire communiqué au cylindre de fer par l'eau chaude s'est communiqué au cuivre, qui l'a transmis en quelques secondes à la face de la pile.

Les différents corps possèdent à des degrés différents le pouvoir de transmettre le mouvement moléculaire ; en d'autres termes, de conduire la chaleur. Le cuivre, dont nous venons de nous servir, possède ce pouvoir à un degré très-éminent. Je vais retirer le cuivre, laisser l'aiguille revenir à 0°, et dresser ensuite sur la face de la pile ce cylindre de verre. Sur le cylindre de verre je place mon cylindre de fer, qui a été réchauffé dans l'eau chaude. Il n'y a pas encore de mouvement de l'aiguille, et vous auriez longtemps à attendre pour la voir se déplacer. Nous avons déjà attendu trois fois plus de temps que le cuivre n'en avait demandé pour transmettre la chaleur, et, vous voyez, l'aiguille reste immobile. Je place successivement sur la pile des cylindres de bois, de craie, de pierre et de terre cuite ; j'échauffe leurs extrémités supérieures de la même manière, et le temps qu'il nous est permis de consacrer à chacune de ces expériences s'écoule sans qu'aucune de ces substances ait pu transmettre de la chaleur à la pile. Les molécules de ces substances sont tellement entremêlées et empêtrées, qu'elles sont impuissantes à se passer librement le mouvement l'une à l'autre. Ces corps sont tous de *mauvais conducteurs* de la chaleur. D'un autre côté, je place successivement sur ma pile des cylindres de zinc, de fer, de plomb, de bismuth, etc. ; chacun d'eux, vous le voyez, a le pouvoir de transmettre le mouvement de la chaleur rapidement à travers sa masse. En comparaison du bois, de la pierre, de la craie, du verre et de l'argile, ils sont tous de *bons conducteurs* de la chaleur.

En règle générale, qui n'est pas toutefois sans exception, les métaux sont les meilleurs conducteurs de la chaleur. Mais les métaux diffèrent notablement entre eux relativement à leur pouvoir de conduction. Pour le prouver, je vais comparer le cuivre et le fer. Ici, derrière moi, sont deux barres, A B, A C (fig. 62), placées bout à bout, avec des billes de bois attachées



Fig. 62.

par de la cire à des distances égales du point de jonction. Sous ce point, je place une lampe à esprit-de-vin qui chauffe les extrémités des barres; la chaleur se propagera à droite et à gauche, à travers toutes les deux. Cette barre est de fer, celle-ci de cuivre; la chaleur parcourra une plus grande distance le long du meilleur conducteur, mettant en liberté un plus grand nombre de billes.

Mais, pour mon but actuel, j'ai besoin d'une expérience plus rapide. Voici deux plaques de métal, l'une de cuivre, l'autre de fer, unies ensemble de manière à former une longue plaque continue, C I (fig. 63 [1]). A cette double plaque est attaché un

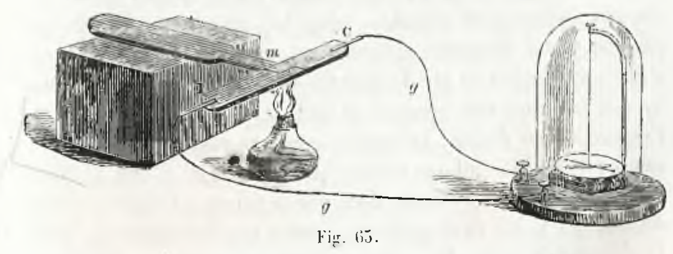


Fig. 63.

manche qui donne à leur ensemble la forme d'un T. De C au

[1] Les deux plaques de la figure 63 devraient être séparées par un petit ntervalle. Deux fils, l'un de fer soudé à la plaque de fer, et l'autre de uivre soudé à la plaque de cuivre, mis en contact, fermeraient le circuit

milieu *m*, la plaque est de cuivre ; de I au milieu *m*, elle est de fer. En C et en I, j'ai soudé aux deux plaques deux petites lames de bismuth, mises en communication par des fils *g*, *g* avec un galvanomètre. Je chauffe la soudure I, en plaçant mon doigt sur elle : il y naît un courant électrique, et vous voyez la déviation produite. L'extrémité rouge de l'aiguille va vers vous. Je retire mon doigt, l'aiguille retombe à 0°. Je chauffe maintenant de la même manière la soudure C ; l'aiguille est déviée, mais dans le sens opposé. Si je place un doigt sur chaque soudure en même temps, les courants se neutralisent l'un l'autre, et nous n'avons pas de déviation. Je place maintenant une lampe à esprit-de-vin, avec une très-petite flamme, directement sous le milieu de la plaque composée : la chaleur se propagera du centre vers les deux extrémités, en traversant d'un côté le cuivre, de l'autre côté le fer. Si la chaleur atteint les deux extrémités au même instant, un courant neutralisera l'autre, et l'aiguille restera en repos. Mais si une des extrémités est atteinte plus tôt que l'autre, nous obtiendrons une déviation, et la direction suivant laquelle l'aiguille se mouvra indiquera quelle est l'extrémité plus vite échauffée. Arrivons à l'expérience. J'approche la lampe, et en trois secondes l'aiguille a fui. L'extrémité rouge vient vers moi, ce qui prouve que C est l'extrémité atteinte ; le mouvement moléculaire s'est propagé plus vite à travers le cuivre. Je laisse la lampe jusqu'à ce que chaque métal ait pris autant de chaleur qu'il en peut prendre, jusqu'à ce que les extrémités des plaques soient devenues stationnaires en fait de température, c'est-à-dire jusqu'à ce que la quantité de chaleur qu'elles reçoivent de la lampe soit exactement égale à celle qui se dissipe dans l'espace autour d'elles. Le cuivre conserve encore sa prédominance ; l'aiguille indique encore que l'extrémité C est la plus échauffée, et nous prouvons ainsi que le cuivre est meilleur conducteur que le fer. Cette petite expérience montre comment, dans la philosophie naturelle, nous mettons un agent en jeu pour

sans engendrer de courant sensible, mais unies comme elles le sont par la figure, les deux plaques par leur contact deviendraient elles-mêmes la source d'un courant électrique.

nous servir à en étudier un autre. Chaque nouvelle découverte est un nouvel instrument de recherches; elle était d'abord un but, elle devient maintenant un moyen, et c'est ainsi que le progrès des sciences est assuré.

L'une des premières méthodes pour déterminer avec exactitude la conductibilité des différents corps pour la chaleur fut proposée par Franklin, et essayée par Ingenhousz. Il revêtit un certain nombre de barres de diverses substances avec de la cire, et, plongeant les extrémités de ces barres dans de l'huile chaude, il observa la distance à laquelle la cire était fondue sur chacune. Les bons conducteurs fondaient la cire à la plus grande distance, et la distance à laquelle avait lieu la fusion donnait la mesure de la conductibilité de la barre.

La seconde méthode est celle indiquée par Fourier, et mise en expérience par Despretz. AB (fig. 64) représente une barre

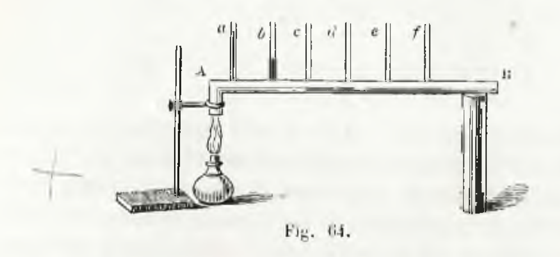


Fig. 64.

de métal avec des trous percés à sa surface et destinés à contenir de petits thermomètres *a*, *b*, *c*...; une lampe était placée à l'extrémité de la barre comme source de chaleur; la chaleur se propageait à travers la barre, atteignant le thermomètre *a* d'abord, puis *b*, puis *c*, etc., et ainsi de suite. Pendant un certain temps les thermomètres continuaient à monter, mais plus tard l'état de la barre devenait stationnaire, et chaque thermomètre marquait une température constante. Plus la conduction est grande, plus est petite la différence entre les indications de deux thermomètres consécutifs. Le décroissement ou *chute* de chaleur, si je puis me servir de cette expression, de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide, est plus grand dans les mauvais conducteurs que dans

les bons ; et de la chute de température indiquée par le thermomètre nous pouvons déduire et exprimer en nombres la conductibilité de la barre. La même méthode a été suivie par MM. Wiedemann et Franz dans de très-importantes recherches ; mais au lieu de se servir de thermomètres, ils ont eu recours à une modification intelligente de la pile thermo-électrique. Voici le résumé des résultats nombreux et grandement intéressants obtenus par ces expérimentateurs :

Noms des substances.	Conductibilité Pour l'électricité.	Pour la chaleur.
Argent.	100	100
Cuivre.	73	74
Or.	59	53
Laiton.	22	24
Étain.	23	15
Fer	13	12
Plomb.	11	9
Platine.	10	8
Maillechort. . .	6	6
Bismuth	2	2

Ce tableau montre que, relativement à leurs pouvoirs conducteurs, les métaux diffèrent considérablement les uns des autres. Par exemple, le pouvoir conducteur de l'argent étant 100, celui du maillechort est seulement 6. Vous pouvez mettre cette différence en évidence d'une manière très-simple, en plongeant deux cuillers, l'une de maillechort et l'autre d'argent pur, dans le même vase d'eau chaude. Après un peu de temps, vous trouvez l'extrémité libre de la cuiller d'argent bien plus chaude que celle de sa voisine ; et si vous placez deux morceaux de phosphore sur les manches des deux cuillers, celui qui sera sur l'argent se fondra et s'enflammera dans un temps très-court, tandis que la chaleur transmise à travers l'autre cuiller n'arrivera jamais à une intensité suffisante pour enflammer le phosphore.

Rien n'est plus intéressant pour le physicien que d'avoir à faire ressortir des points de contact et des rapports plus ou moins intimes entre les divers agents de la nature. Nous savons qu'ils ont une fraternité commune ; nous savons qu'ils sont mutuelle-

ment convertibles l'un dans l'autre; mais nous ne connaissons encore que très-peu de chose du mode précis de cette conversion. Nous avons toute raison de conclure que la chaleur et l'électricité sont l'une et l'autre des modes de mouvement ; nous savons expérimentalement qu'avec de l'électricité nous obtenons de la chaleur, et qu'avec de la chaleur, comme dans le cas de notre pile thermo-électrique, nous obtenons de l'électricité. Mais quoique nous ayons, ou que nous pensions avoir, des idées passablement claires du caractère du mouvement de la chaleur, nos idées sont très-obscures quant à la nature précise du changement que ce mouvement doit subir pour apparaître sous forme d'électricité ; en réalité, nous n'en savons encore rien là-dessus.

Notre tableau, néanmoins, manifeste une liaison très-importante entre la chaleur et l'électricité. En outre des nombres exprimant la conductibilité pour la chaleur, MM. Wiedemann et Franz ont placé les nombres exprimant la conductibilité des mêmes métaux pour l'électricité. Les deux séries de nombres s'accordent ; le corps bon conducteur de la chaleur est bon conducteur de l'électricité ; le corps mauvais conducteur de la chaleur est mauvais conducteur de l'électricité[1]. Nous pouvons ainsi affirmer que les qualités physiques, qui interviennent dans la transmission de la chaleur, interviennent en même proportion dans la transmission de l'électricité. Cette susceptibilité commune aux deux forces indique un rapport plus intime, que les recherches futures mettront certainement en évidence.

Permettez-moi de signaler un autre trait d'union entre la chaleur et l'électricité. J'ai ici une longueur de fil faite de morceaux de deux espèces de fils différents : de trois morceaux de platine de 6 à 10 centimètres de longueur, et de trois morceaux d'argent de même longueur et de même diamètre. C'est un fait démontré que la quantité de chaleur développée dans un fil par le passage d'un courant électrique d'une intensité donnée est directement proportionnelle à la résistance du fil[2]. Nous pouvons

[1] M. le professeur Forbes avait signalé cet accord auparavant.
[2] Joule, *Phil. Mag.*, 1841, vol. XIX, p. 265.

nous figurer les atomes se jetant comme une barrière en travers du courant électrique, et le courant électrique se butant contre les atomes, leur communiquant son mouvement, et rendant le fil chaud. Dans le cas du bon conducteur, au contraire, on peut se figurer le courant comme glissant librement autour des atomes sans les déranger à un haut degré. J'envoie maintenant le même courant d'une batterie de vingt éléments de Grove à travers ce fil composé. Vous voyez aussitôt trois espaces chauffés au rouge blanc, séparés par trois espaces obscurs. Les portions rouge blanc sont les fils de platine, les portions obscures sont les fils d'argent. Le courant électrique se brise impétueusement contre les molécules du platine, tandis qu'il glisse avec peu de résistance entre les atomes de l'argent, produisant ainsi, dans les métaux, des effets calorifiques très-différents [1].

Je désire maintenant vous faire voir que le mouvement de chaleur interfère avec le mouvement d'électricité ou l'empêche. Vous connaissez la petite lampe de platine placée en avant de la table; elle consiste simplement en une petite hélice de fil de platine convenablement fixée à un support de laiton. Je puis faire passer un courant à travers cette hélice et la rendre incandescente. Mais vous remarquerez que j'ai introduit dans le circuit une longueur additionnelle de fil mince de platine de 60 centimètres, et si je ferme le circuit, le même courant passera à travers le fil et à travers l'hélice. Tous les deux, vous le voyez, sont portés au rouge; tous les deux sont dans un état de mouvement moléculaire intense. Ce que je désire maintenant prouver est que ce mouvement de chaleur, que l'électricité a engendré dans ces deux longueurs de fil, et en vertu duquel elles sont incandescentes, fait obstacle au passage du courant. L'électricité s'est suscité un ennemi sur son propre chemin. Je vais refroidir le fil, et par là forcer la chaleur à s'apaiser. J'ouvrirai ainsi une plus large porte au passage de l'électricité. Mais s'il passe plus d'électricité, elle manifestera sa présence dans la lampe de pla-

[1] L'éther condensé qui environne les atomes ne peut-il pas être le véhicule des courants électriques?

tine ; elle fera passer l'hélice du rouge au rouge-blanc, et le changement dans l'intensité de la lumière sera visible à tous les yeux.

Je plonge donc mon fil chauffé au rouge dans un verre d'eau W (fig. 65) ; regardez la lampe, elle éblouit presque le regard.

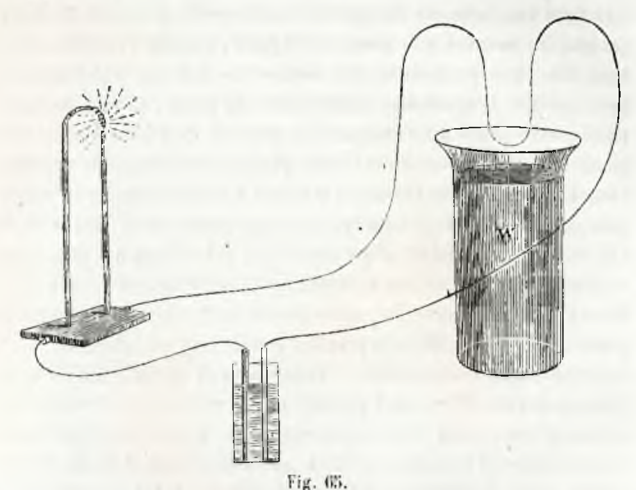


Fig. 65.

Je sors le fil de l'eau, et je laisse le mouvement de chaleur se développer de nouveau ; le mouvement d'électricité est instantanément empêché, la lampe perd son éclat. Je plonge de nouveau le fil dans l'eau froide plus profondément qu'auparavant ; voyez comme la lumière devient intense ; je l'enfonce plus encore, au point de refroidir les 60 centimètres de fil tout entier ; le courant accru porte la lampe à son maximum d'éclat, mais voici qu'elle s'éteint subitement. Le circuit est rompu ; c'est que, en effet, l'hélice a été réellement fondue par le flux additionnel d'électricité.

Consacrons maintenant un moment à la conduction du froid. Selon toute apparence, le froid peut être conduit comme la chaleur. Voici un cylindre de cuivre que je chauffe un peu en le tenant un instant dans ma main. Je le place sur la pile, et l'ai-

guille va à 90°, accusant de la chaleur. Sur ce cylindre j'en place un second, que, comme vous le remarquez, j'ai refroidi en le plongeant pendant quelque temps dans cette masse de glace. Attendons un moment : l'aiguille se meut, elle descend d'abord à zéro, le passe et va à 90° du côté du froid. L'analogie pourrait très-bien vous amener à supposer que le froid est conduit de haut en bas, du sommet à la base du cylindre, comme l'était la chaleur dans nos premières expériences. Je n'ai pas d'objection à faire contre l'expression *conduction du froid*, si elle est employée avec pleine connaissance du procédé physique mis réellement en jeu. La marche réelle du phénomène est que le cylindre chaud intermédiaire transmet d'abord son mouvement ou sa chaleur au cylindre froid superposé, et qu'ayant ainsi perdu de la chaleur qu'il possédait, il en prend à la pile. Dans nos premières expériences, nous avions conduction de mouvement vers la pile ; dans l'expérience actuelle, nous avons conduction de mouvement partant de la pile. Dans le premier cas, la pile est échauffée ; dans le second, elle est refroidie ; l'échauffement produit un courant positif, le refroidissement produit un courant négatif ; mais dans les deux cas, c'est à la propagation du mouvement que nous avons affaire, l'échauffement et le refroidissement dépendent uniquement de la direction de la propagation. Je place un de ces cylindres de métal, que j'ai préalablement refroidis, sur la face de notre pile ; il en résulte une violente déviation, annonçant le refroidissement de l'instrument. Supposerons-nous que le froid soit une entité communiquée à la pile? Non. La pile ici est le corps chaud ; son mouvement moléculaire est en excès sur celui que possède le cylindre ; et lorsque l'un et l'autre viennent en contact, la pile cherche à compenser le déficit. Elle fait part d'une portion de son mouvement au cylindre, et, appauvrie par sa bonté, elle se refroidit et engendre le courant né du froid.

Je retire le cylindre froid de métal, et je place sur la pile un cylindre de bois, ayant la même température que le métal. Le froid est très-faible, et la déviation par conséquent très-petite. Pourquoi le bois froid ne produit-il pas une action égale à celle du métal froid? Simplement parce que la chaleur communiquée

par la pile, s'accumulant à sa surface inférieure, ne peut pas s'échapper à travers le bois, mauvais conducteur, comme elle s'échappait à travers le métal ; la quantité de chaleur soutirée à la pile par le bois est par conséquent moindre que celle soustraite par le cuivre. Le même effet a lieu lorsqu'on substitue les nerfs humains à la pile. Supposez que vous entriez dans une chambre froide et que vous mettiez votre main successivement sur les chenets, la cheminée, les chaises, le parquet, etc., ils vous paraîtront être à des températures différentes : le fer vous refroidit plus que le marbre, le marbre plus que le bois, et ainsi de suite. Votre main est affectée exactement comme la pile l'était dans la dernière expérience. Il n'est pas besoin de dire que l'inverse a lieu quand vous entrez dans une chambre chaude, c'est-à-dire une chambre plus chaude que votre propre corps. Je souffrirais certainement si j'étais couché sur une plaque de métal dans un bain turc ; mais je ne souffre pas quand je suis couché sur un banc de bois. En préservant le corps du contact avec de bons conducteurs, on peut endurer de très-hautes températures. On peut faire cuire des œufs et des biftecks par la chaleur d'un appartement dans lequel des corps vivants d'hommes n'éprouveraient point de mal.

La philosophie exacte de cette dernière expérience mérite un moment d'attention. Avec elle sont associés les noms de Blagden et de Chautrey, ces hommes éminents qui s'exposèrent eux-mêmes dans des fours à des températures considérablement plus élevées que celle de l'eau bouillante. Comparons la condition de ces êtres humains vivants avec celle de deux statues de marbre placées dans le même four : les statues deviennent graduellement plus chaudes, jusqu'à ce que finalement elles prennent la température de l'air du four ; la température du corps des deux sculpteurs, dans les mêmes circonstances, ne s'élevait pas autant. Si elle l'avait fait, les tissus du corps auraient été infailliblement détruits, parce que la température atteinte aurait été plus que suffisante pour cuire les muscles dans leurs propres liquides. Mais le fait est que la chaleur du sang est à peine affectée par l'augmentation de la chaleur externe. Cette chaleur, au lieu

d'être appliquée à augmenter la température du corps, est appliquée à produire du travail, en modifiant l'agrégation du corps; elle prépare la transpiration, la force à traverser les pores, et la vaporise en partie. La chaleur est convertie ici en *énergie potentielle*; elle est consommée en travail. C'est le canal, si je puis me servir de cette expression, par où le trop-plein de chaleur s'écoule, et de là vient que, sous les conditions de climat les plus variables, la température du sang humain est pratiquement constante. Le sang d'un Lapon est sensiblement aussi chaud que celui d'un Indou; et le navigateur anglais, en faisant voile du nord au sud ou du sud au nord, trouve que la température de son sang est à peine augmentée à mesure qu'il approche de l'équateur, à peine diminuée à mesure qu'il s'approche du pôle antarctique.

Lorsque la communication de la chaleur est graduelle, comme elle l'est toujours quand le corps est environné d'un conducteur imparfait, la chaleur est consommée de la manière indiquée, à mesure qu'elle est fournie; mais si l'apport de chaleur est si rapide (comme elle le serait dans le cas du contact avec un bon conducteur) que la conversion en énergie potentielle inoffensive ne puisse être exécutée avec une rapidité suffisante, le dommage causé aux tissus est inévitable. Quelques-uns ont professé qu'ils voyaient dans ce pouvoir du corps vivant, de résister à une haute température, une action conservatrice particulière à la force vitale. Il n'est pas douteux que toutes les actions de l'organisme animal sont liées à ce que nous appelons sa vitalité; mais l'action dont il est question est de même ordre que la fusion de la glace, ou la vaporisation de l'eau. Elle consiste simplement en ce que la chaleur, au lieu de produire des effets de température, a produit du travail.

Jusqu'ici, nous avons comparé entre eux les pouvoirs conducteurs de différents corps; mais une même substance peut posséder des pouvoirs de conduction différents dans des directions différentes. Plusieurs cristaux sont tellement bâtis, que le mouvement de chaleur se propage avec une facilité plus grande suivant certaines lignes d'atomes que suivant d'autres. Voici, par

exemple, un gros cristal de roche, un cristal de quartz, formant un prisme hexagonal, qui, s'il était complet, serait terminé par deux pyramides à six faces. La chaleur se propage avec une plus grande facilité suivant l'axe de ce cristal que transversalement à cet axe. Ceci a été prouvé d'une manière très-simple par M. de Sénarmont.

J'ai ici deux plaques de quartz taillées l'une parallèlement et l'autre perpendiculairement à l'axe. Je recouvre les plaques d'une couche de cire blanche, que j'étends avec un pinceau de poil de chameau. Les plaques sont percées au centre, et dans le trou j'introduis un fil que j'échauffe par un courant électrique. B (fig. 66) est la pile d'où le courant procède; *c* est une capsule

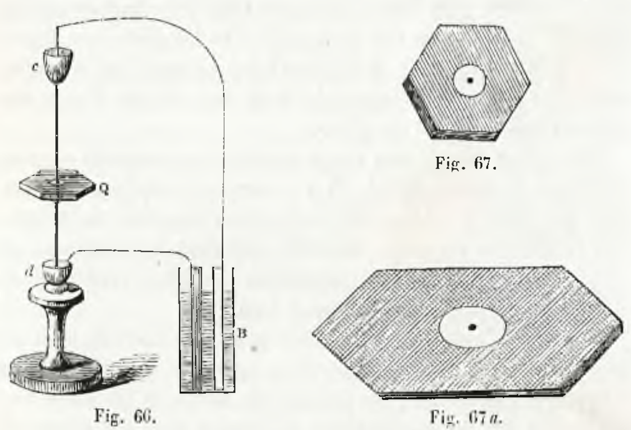


Fig. 66.

Fig. 67.

Fig. 67 *a*.

de bois à travers le fond de laquelle passe une aiguille à coudre; *d* est une seconde capsule dans laquelle plonge la pointe de l'aiguille, et Q est la plaque perforée de quartz. Chaque capsule contient une goutte de mercure. Lorsque le courant passe de *c* en *d*, l'aiguille est échauffée, et la chaleur se propage dans tous les sens. La cire fond tout autour du point où la chaleur est appliquée; et, sur cette première plaque taillée perpendiculairement à l'axe du quartz, je trouve que la courbe, limite de la cire fondue, est un cercle parfait (fig. 67). La chaleur a marché tout

autour avec la même rapidité ; elle a fondu la cire à la même distance dans toutes les directions. Je fais une expérience semblable avec la seconde plaque; la cire fond encore; mais je remarque que sa figure n'est plus un cercle. La chaleur marche plus vite le long de l'axe que perpendiculairement à l'axe, et voilà pourquoi la figure est une ellipse au lieu d'être un cercle (fig. 67 *a*). En attendant que la cire se sèche, je vais projeter les images agrandies des deux plaques sur l'écran, et vous verrez sur l'une la figure circulaire, sur l'autre la figure ovale de la cire fondue. Le spath d'Islande conduit mieux suivant l'axe cristallographique qu'à angle droit avec cet axe ; tandis qu'un cristal de tourmaline conduit mieux dans le sens perpendiculaire à son axe. Un métal, avec lequel vous avez déjà fait connaissance, le bismuth, se clive avec une plus grande facilité dans une direction; or MM. Svanberg et Matteucci ont démontré qu'il conduit mieux la chaleur et l'électricité le long des plans de clivage que perpendiculairement à ces plans.

Nous avons dans le bois un exemple très-remarquable de cette différence de conductibilité. Il y a plus de vingt ans déjà que MM. de la Rive et de Candole ont fait des recherches sur le pouvoir conducteur du bois [1], et établi, sur cinq échantillons examinés, que la vitesse de transmission était plus grande le long des fibres que perpendiculairement à elles.

Le mode d'expérimentation était celui que l'on adopte communément dans les recherches de ce genre, et que M. Despretz a appliqué aux métaux. On prenait une barre de la substance; on mettait une de ses extrémités en contact avec une source de chaleur, et on l'y laissait jusqu'à ce qu'elle prît une température stationnaire. Les températures atteintes par la barre, à diverses distances de l'extrémité chauffée, étaient indiquées par des thermomètres plongeant dans des cavités destinées à les recevoir ; avec ces données et l'aide d'une formule bien connue, on déterminait la conductibilité du bois.

[1] *Mém. de la Société de Genève*, vol. IV, p. 70.
[2] *Annales de Chimie et de Physique*, décembre 1827.

Pour déterminer la vitesse de transmission calorifique dans différentes directions à travers le bois, j'ai imaginé, il y a quelques années, l'instrument représenté fig. 68. QQ'RR' est un morceau oblong d'acajou, A est une barre d'antimoine, B une barre de bismuth. Les extrémités unies des deux barres sont tenues en contact serré par les mâchoires d'ivoire I, I'; les deux autres extrémités pénètrent dans une seconde pièce d'ivoire, où elles sont solidement fixées. Deux bouts de fil de platine soudés à ces extrémités vont à deux petites coupes d'ivoire M, M, entrent par les flancs des coupes, et communiquent avec une goutte de mercure placée dans l'intérieur. L'acajou est entaillé de sorte que les surfaces supérieures des barres A et B, qui y sont encastrées, dépassent un peu le niveau général de la planche d'acajou. Les mâchoires d'ivoire I, I' sont pareillement encastrées. On voit sur la figure deux petites saillies partant de I, I'; on tend d'une de ces saillies à l'autre une membrane fine, de manière à former une petite chambre en avant de la soudure en forme de coin du bismuth et de l'antimoine. Le fond de la chambre est tapissé d'ivoire. S est un curseur de bois, que l'on peut faire avancer doucement, en avant et en arrière, le long d'une rainure taillée de biais, au moyen du levier L. Ce levier tourne sur un pivot dressé près de Q; il entre dans une fente horizontale ménagée au sein du curseur, auquel il est fixé par une cheville p', qui les traverse tous les deux; on a ménagé dans le levier, tout autour de p', une ouverture oblongue, avec jeu latéral suffisant pour pouvoir faire avancer le curseur en ligne droite. On voit à l'extrémité du curseur deux saillies recouvertes aussi par une membrane mince, de manière à ménager une seconde chambre fermée, sur trois de ses parois et au fond par du bois, en avant par la membrane. Un fil mince de platine, replié plusieurs fois sur lui-même, de manière à former une espèce de grille, appuie, contre le derrière de cette chambre, et, par un coup de marteau, on le fait pénétrer dans le bout du curseur, qu'on lime ensuite, de manière à enlever la moitié de l'épaisseur du fil de platine et à réduire le tout à une surface uniformément plane. Contre cette surface commune du curseur et du fil, on colle une plaque de

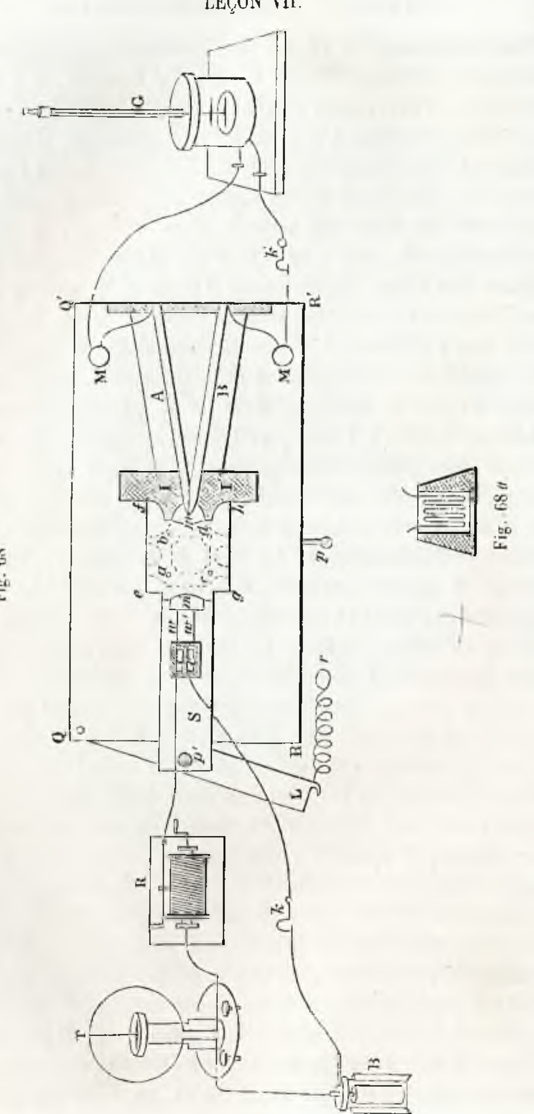


Fig. 68

Fig. 68 a

mica très-mince, mais qui intercepte le contact entre le fil plié de platine et la petite quantité de mercure que la chambre m' est destinée à contenir ; les bouts w, w' du fil plié vont à deux petites coupes, c, c', creusées dans un morceau d'ivoire ; et traversant les parois des coupes, arrivent en contact avec le mercure qui les remplit. Le bout du curseur, revêtu de son fil plié, apparaît dans la figure 68 a. L'espace rectangulaire $e\ f\ g\ h$ (fig. 68) est taillé dans toute la masse de la pièce d'acajou, à laquelle une plaque de cuivre est vissée par dessous ; de cette plaque (qui, pour des raisons qui vont être expliquées, est taillée comme l'indiquent les lignes ponctuées dans la figure), surgissent quatre pointes coniques qui sur la figure semblent être au même niveau que les surfaces supérieures des barres de bismuth et d'antimoine, mais qui en réalité sont plus basses de 7 à 8 millimètres.

Le bois à examiner, réduit à la forme d'un cube, repose, appuyé par deux bascules sur les quatre supports a, b, c, d. On amène le curseur S en contact avec le cube, solidement appuyé entre les saillies des pièces d'ivoire I, I', d'un côté, et celles du curseur S, de l'autre. Les chambres m, m' étant remplies de mercure, la membrane qui les recouvre est pressée doucement contre le tube par la masse fluide intérieure, et l'on assure de cette manière un contact parfait, absolument essentiel au succès de l'expérience.

Le problème à résoudre est le suivant : Appliquer une source de chaleur d'une intensité rigoureusement mesurable et que l'on puisse toujours atteindre aisément, à cette face du cube qui est en contact avec la membrane de l'extrémité du curseur, et déterminer la quantité de cette chaleur qui, traversant le cube, arrive dans une minute à la face opposée ou postérieure. La solution de ce problème exige deux choses : premièrement, la source de chaleur qu'il faut appliquer à la face antérieure du cube ; et, secondement, un moyen de mesurer la quantité qui a fait son apparition à la face opposée après l'expiration d'une minute.

Pour obtenir une source de chaleur qui satisfasse aux conditions énoncées, on a recours à la méthode suivante : B est une petite pile galvanique, émettant un courant qui va à la boussole

des tangentes T ; le courant suit l'anneau de l'instrument en faisant dévier par son passage l'aiguille magnétique suspendue au centre de l'anneau : il va de la boussole T au rhéostat R, formé d'un cylindre de serpentine, autour duquel est enroulé un fil de maillechort. Quand, en faisant tourner la manivelle de l'instrument, on a déroulé et introduit dans le circuit la longueur voulue de fil, le courant se trouve réglé comme il doit l'être. L'emploi de ces deux derniers instruments, dans la série actuelle d'expériences, a pour but unique de tenir le courant parfaitement constant d'un jour à l'autre. Du rhéostat, le courant va d'abord à la cavité c, de là par le fil plié, puis, en revenant sur es pas, à la coupe c', pour atteindre l'autre pôle de la pile.

Le fil plié, durant le passage du courant, s'échauffe doucement ; cette chaleur est transmise par le mercure de la chambre m' à la membrane qui la couvre. Cette membrane devient la source immédiate de la chaleur appliquée à la face antérieure ou gauche du cube. La quantité de chaleur transmise de cette source par la masse du cube à la face opposée, en un temps donné, est mesurée par la déviation qu'elle fait subir à l'aiguille d'un galvanomètre relié au couple bismuth et antimoine. G est ce galvanomètre envoyant les fils aux coupes remplies de mercure m, m', qui, comme on l'a vu précédemment, sont unies par des fils de platine avec les barres A, B.

On sait que le mercure dissout le bismuth, et que le contact de ces deux métaux donne promptement naissance à un amalgame. Pour défendre le couple thermo-électrique contre cette action délétère, on entoure son extrémité d'un fourreau fait avec une membrane identique à celle qui ferme les chambres m, m'.

Avant que le cube soit interposé entre les deux membranes, celles-ci, poussées par la masse fluide située derrière elles, se bombent un peu, formant ainsi une paire de coussins doux et légèrement convexes. Lorsque le cube est placé sur ses supports, et que le curseur est pressé contre lui, les deux coussins redeviennent plats et procurent un contact parfait. La surface du cube étant plus grande que la surface de la membrane [1], le cube

[1] Le côté de chaque cube mesure 8 millimètres.

est toujours solidement arrêté entre les saillies rigides opposées, tandis que le curseur est maintenu dans sa position par le ressort *r*, alors attaché à la cheville *p*. Voici comment on procède à l'expérience. Quand on a constaté que l'aiguille du galvanomètre marque zéro, lorsque le circuit thermo-électrique est fermé, on interrompt celui-ci en agissant sur la clef ou commutateur *k'*. A un moment donné et marqué par la grande aiguille d'une montre, on ferme le circuit avec la clef *k*, et on laisse circuler le courant pendant soixante secondes; à la soixantième seconde, le circuit est rompu par la main gauche en *k*, tandis que, au même instant, la main droite le referme avec la clef *k'*. L'aiguille du galvanomètre est déviée à l'instant, et l'on note la limite de la première excursion; l'étendue de cette excursion dépend évidemment de la quantité de chaleur qui a atteint la soudure du bismuth et de l'antimoine à travers la masse du cube pendant la durée du courant. Dès que l'écart a été noté, on retire le cube, et on laisse refroidir l'instrument jusqu'à ce que l'aiguille du galvanomètre revienne à zéro. On introduit un autre cube; on ferme de nouveau le circuit; on laisse circuler le courant pendant soixante secondes; on interrompt le circuit avec la main gauche, pour le refermer au même moment avec la main droite; on note l'écart de l'aiguille du galvanomètre, etc., etc.

A en juger par la description, l'expérience paraît très-complexe; mais il n'en est pas ainsi en réalité. Un seul expérimentateur commande de la manière la plus absolue à l'appareil tout entier. Les fils qui partent de la petite pile galvanique d'un seul couple restent parfaitement en place pendant des jours entiers; tout ce qu'il y a à faire est de rattacher la pile aux fils; tout est alors prêt pour l'expérience.

Il y a dans le bois trois directions à angle droit les unes sur les autres, que le seul aspect de la substance nous permet de fixer comme étant les résultantes nécessaires de l'action moléculaire; la première est parallèle aux fibres; la seconde perpendiculaire à la fois aux fibres et aux couches ligneuses qui forment la croissance annuelle de l'arbre; la troisième enfin est encore perpendiculaire aux fibres, mais parallèle ou plutôt tangente aux

couches. On a taillé dans chacun des arbres un cube qui satisfaisait aux conditions suivantes :

Deux faces étaient parallèles aux couches ligneuses, deux étaient perpendiculaires à ces mêmes couches; les deux faces restantes étaient perpendiculaires aux fibres. Il s'agissait d'examiner la vitesse de transmission de la chaleur à travers le bois dans ces trois directions. Il importe de remarquer que les cubes étaient de très-bons échantillons moyens, qu'ils avaient tous été coupés en saison favorable et qu'ils étaient très-secs.

Le cube était d'abord placé sur les quatre supports a, b, c, d, de sorte que la ligne de flux calorifique allant de m' à m fût parallèle à la fibre, et l'on observait la déviation produite par la chaleur transmise en soixante secondes. On changeait alors la position du cube; on plaçait la fibre verticalement, de sorte que la ligne de flux de m' à m devînt perpendiculaire à la fibre et parallèle aux couches ligneuses; on observait de nouveau la déviation produite par l'action d'une minute. On tournait de nouveau le cube de 90 degrés, la fibre restant verticale; la ligne de flux devenait perpendiculaire à la fois à la fibre et aux couches, et on mesurait une dernière fois la déviation. Dans la comparaison de ces deux dernières directions, il est nécessaire de manipulations plus délicates. Il suffit d'une expérience grossière pour mettre en évidence la plus grande vitesse de propagation dans le sens des fibres; mais les vitesses dans toutes les directions perpendiculaires aux fibres sont si près d'être égales, que c'est seulement par un redoublement de soins et, dans le plus grand nombre des cas, par des expériences plusieurs fois répétées que l'on parvient à établir avec certitude une différence d'action.

La table suivante donne quelques-uns des résultats des expériences; elle s'expliquera d'elle-même :

DESCRIPTION DU BOIS	DÉVIATIONS		
	I Parallèle aux fibres	II Perpendiculaire aux fibres et parallèle aux couches ligneuses	III Perpendiculaire aux fibres et aux couches ligneuses
	°	°	°
1 Bouleau d'Amérique. . . .	53	9,0	11,0
2 Chêne.	54	9,5	11,0
3 Hêtre.	53	8,8	10,8
4 Bois de Coromandel. . . .	53	9,8	12,5
5 Erable œil d'oiseau. . . .	51	11,0	12,0
6 Bois de lance.	51	10,6	12,1
7 Buis.	51	9,9	12,0
8 Bois de teak.	51	9,9	12,4
9 Bois de rose.	51	10,4	12,6
10 Bois du Pérou	50	10,7	11,7
11 Green-heart	29	11,4	12,6
12 Noyer.	28	11,0	13,0
13 Frêne pleureur.	28	11,0	12,0
14 Cacao (bois de).	28	11,9	13,6
15 Bois de sandal.	28	10,0	11,7
16 Tulipier.	28	11,0	12,1
17 Bois de camphre.	28	8,6	10,0
18 Olivier	28	10,5	13,2
19 Frêne.	27	9,5	11,5
20 Chêne noir.	27	8,0	9,4
21 Pommier	26	10,0	12,5
22 Bois de fer.	26	10,2	12,4
23 Châtaignier.	26	10,1	11,5
24 Sycomore	26	10,6	12,2
25 Acajou du Honduras . . .	25	9,0	10,0
26 Bois de Brésil.	25	11,9	13,9
27 If.	24	11,0	12,0
28 Orme.	24	10,0	11,5
29 Platane.	24	10,0	12,0
30 Laurier de Portugal. . . .	24	10,0	11,5
31 Acajou d'Espagne.	23	11,5	12,5
32 Sapin d'Ecosse.	22	10,0	12,0

La table ci-dessus confirme le résultat auquel étaient arrivés MM. de la Rive et de Candolle, relativement à la conductibilité plus grande du bois dans la direction des fibres. Elle prouve ainsi combien peu la simple densité influe sur la vitesse de transmission. Il paraîtrait qu'il n'est sous ce rapport aucune loi ou règle générale. Le bouleau d'Amérique, bois comparativement léger, possède sans aucun doute le pouvoir de transmission le plus élevé de toute la liste. Le bois de fer, au contraire, avec un

poids spécifique de 1,426, est beaucoup au-dessous. Au contraire, le chêne et le bois de Coromandel, ce dernier si dur et si dense que les tribus sauvages s'en servent pour faire des instruments tranchants, sont presque en tête de la liste, tandis que le sapin d'Écosse et d'autres bois légers sont très-bas.

Si nous jetons les yeux sur la seconde et la troisième colonne de la table, nous voyons que dans tous les cas la vitesse de propagation est la plus grande dans une direction perpendiculaire aux couches ligneuses. La loi de l'action moléculaire, en ce qui regarde la transmission de la chaleur à travers les bois, peut donc s'énoncer comme il suit :

A tous les points non situés au centre de l'arbre, le bois possède trois axes inégaux de conduction calorifique, à angles droits l'un sur l'autre. Le premier axe principal est parallèle à la fibre du bois ; le second axe intermédiaire est perpendiculaire à la fois aux fibres et aux couches ligneuses ; tandis que le troisième et dernier axe est perpendiculaire aux fibres et parallèle aux couches.

MM. de la Rive et de Candolle ont fait remarquer l'influence que le faible pouvoir conducteur d'un arbre dans la direction latérale doit exercer pour conserver à l'intérieur la chaleur qu'il reçoit du sol. En vertu de cette propriété, l'arbre est capable de résister aux changements brusques de température qui sans cela lui seraient très-probablement préjudiciables; il résiste également et à la soustraction soudaine de la chaleur intérieure, et à l'invasion subite de la chaleur extérieure. Mais la nature est allée plus loin, et elle a habillé les arbres d'un fourreau, matière plus mauvaise conductrice que le bois, même dans la direction où le bois conduit le moins. Voici les déviations obtenues en soumettant un certain nombre de cubes d'écorce, de même volume que les cubes de bois, aux mêmes conditions d'expérience :

	Déviation.	Déviation correspondante produite par le bois.
Écorce de hêtre.	7°	10,8°
Écorce de chêne.	7°	11,0°
Écorce d'orme.	7°	11,5°
Écorce de sapin	7°	12,0°

la direction de transmission étant de la surface intérieure de l'écorce au dehors.

La déviation moyenne produite par un cube de bois lorsque le flux est latéral, est en moyenne de

12°

un cube de cristal de roche, silice pure, de même volume, produit une déviation de

90°

Deux corps si différents, lorsqu'ils couvrent une portion considérable de la surface de la terre, doivent affecter le climat très-différemment. Il est de très-fortes raisons expérimentales pour croire que le pouvoir conducteur du cristal de roche est plus élevé que celui de quelques-uns des métaux.

Les nombres suivants expriment le pouvoir transmissif de quelques structures organiques; des cubes de ces diverses substances étaient examinés à la manière ordinaire.

Dent de Walrus.	16
Défense d'éléphant des Indes orientales . . .	17
Baleine..	9
Corne de rhinocéros.	9
Corne de vache.	9

Des changements subits de température sont préjudiciables à la santé des animaux et des végétaux; aussi les substances employées dans la structure des tissus organiques sont telles qu'on n'aurait pas pu les mieux calculer pour résister à ces changements.

Les nombres qui suivent, mettent en évidence la vérité de cette assertion. Toutes les substances indiquées, ramenées à la forme du cube, étaient essayées de la même manière que le bois et le quartz. Mais, tandis qu'un cube de cette dernière substance produit une déviation de 90°, un cube de

Cire à cacheter produit une déviation de. . . .	0°
Cuir de semelle	0°
Cire d'abeilles.	0°

Glu.	0°
Gutta-percha.	0°
Caoutchouc.	0°
Noyau d'aveline	0°
Noyau d'amande	0°
Muscle de jambon cuit.	0°
Muscle de veau cru	0°

Toutes ces substances sont des productions animales ou végétales; et les expériences démontrent l'extrême imperméabilité de chacune d'elles. Partant du principe que les additions ou soustractions subites de chaleur sont préjudiciables à la santé des animaux et des végétaux, nous voyons que les matières choisies sont précisément celles qui sont le mieux calculées pour écarter de tels changements.

Je désire maintenant appeler votre attention sur une expérience qui, à première vue, vous paraîtra paradoxale. Voici deux prismes courts et de même volume, l'un de bismuth, l'autre de fer. Je recouvre les extrémités des deux prismes de cire blanche, et je les place debout avec leurs surfaces blanches de cire en haut, sur le couvercle de ce vase, qui contient de l'eau chaude. Le mouvement de chaleur se propagera à travers les prismes, et vous aurez à observer la fusion de la cire. Elle commence à fondre, mais sur quoi? Sur le bismuth. La cire blanche n'apparaît plus au sommet du bismuth, elle s'est répandue en forme de couche liquide transparente, tandis que la cire sur le fer n'est pas encore fondue. Comment concilier ce résultat avec le fait établi dans notre table (pages 206), que, la conduction du fer étant 12, la conduction du bismuth est seulement 2? Dans cette expérience le bismuth semble être le meilleur conducteur. Nous trouverons le mot de cette énigme en retournant à notre tableau des chaleurs spécifiques (Leçon V); nous y lisons que, la chaleur spécifique du fer étant 1138, celle du bismuth est seulement 308; donc, pour élever d'un certain nombre de degrés la température du fer, il faut plus de trois fois la quantité absolue de chaleur requise par le bismuth. Ainsi, quoique le fer soit réellement un bien meilleur conducteur que le bismuth, et qu'il reçoive actuellement, dans chaque unité

de temps, une bien plus grande quantité de chaleur que le bismuth, cependant, en conséquence du nombre de ses atomes, ou de la grandeur de son travail intérieur, l'élévation de température, dans le cas du fer, est lente. Le bismuth, au contraire, peut immédiatement consacrer une large proportion de la chaleur qui lui est communiquée à l'élévation de température; et l'emporte ainsi, en apparence, sur le fer, quant à la transmission du genre de mouvement auquel la température est due.

Vous voyez par là très-clairement l'inexactitude d'une assertion que l'on rencontre quelquefois dans les traités de physique, et qui échappe très-fréquemment aux candidats dans les examens que nous leur faisons subir relativement à l'expérience d'Ingenhousz, dont j'ai déjà dit un mot. On affirme habituellement que plus est grande la *rapidité* avec laquelle la cire se fond, plus le corps est bon conducteur. Si le corps mauvais conducteur et le corps bon conducteur avaient la même chaleur spécifique, cela serait vrai, mais il n'en est pas ainsi, comme on le sait et comme on vient de le voir dans notre dernière expérience. La vraie manière de procéder, ainsi qu'il a été déjà indiqué, est d'attendre que le fer et le bismuth aient tous les deux atteint une température constante; que chacun d'eux, de fait, ait reçu de la source de chaleur et transmis tout le mouvement qu'il peut recevoir ou transmettre; lorsque cela a eu lieu, on trouve que la quantité de chaleur transmise par le fer est six fois plus grande que celle qui est transmise par le bismuth. Vous vous souvenez de nos expériences avec l'instrument de Trevelyan, et vous savez combien il est utile d'avoir, pour support du berceau, une substance très-dilatable. Le plomb est bon, précisément parce qu'il est dans ces conditions. Le coefficient de dilatation du zinc est légèrement plus élevé que celui du plomb; et cependant le zinc ferait un mauvais support. La raison en est que la chaleur spécifique du zinc est plus de trois fois celle du plomb, de sorte que la chaleur communiquée au zinc par le contact du berceau produit une augmentation de température moindre des deux tiers, et détermine par conséquent une dilatation plus faible dans la même proportion.

Ces considérations montrent aussi que, dans nos expériences sur les bois, la quantité de chaleur transmise par notre cube en une minute de temps, ne peut pas, rigoureusement parlant, être regardée comme l'expression de la conductibilité du bois, à moins que la chaleur spécifique des différents bois ne soit la même. Sur ce point il n'y a pas eu d'expériences de faites. Mais en ce qui concerne l'influence de la structure moléculaire, les expériences conservent toute leur valeur, car on compare alors une direction avec une autre, *dans un même cube*. Quant aux structures organiques, je puis ajouter que, même en leur laissant le temps d'accepter tout le mouvement qu'elles sont capables de recevoir d'une source de chaleur, le pouvoir de transmission de ce mouvement reste excessivement bas. Ce sont réellement de très-mauvais conducteurs.

C'est l'imparfaite conductibilité des tissus de laine qui les rend si éminemment propres à servir de vêtement. Ils préservent le corps des augmentations et des pertes subites de chaleur. Cette même qualité de non-conductibilité se manifeste lorsque nous enveloppons un bloc de glace avec de la flanelle; la glace, ainsi préservée, ne se fond pas aisément. Dans le cas d'un corps humain, par un jour froid, le vêtement de laine empêche la transmission de mouvement de dedans au dehors; dans le cas de la glace, par un jour chaud, la même étoffe empêche la transmission de mouvement de dehors en dedans. Les animaux qui habitent les climats froids ont été pourvus par la nature des vêtements qui leur sont nécessaires. Les oiseaux, spécialement, ont besoin de cette protection, car ils sont encore plus à sang chaud que les mammifères. Ils sont pourvus de plumes, et les interstices entre les plumes sont remplis de duvet, qui par sa constitution moléculaire et sa contexture mécanique, est peut-être le plus mauvais de tous les conducteurs. C'est un autre exemple de ces harmonieux rapports de la vie aux conditions de la vie, qui se retrouve partout dans l'étude des sciences naturelles.

L'infatigable Rumford a fait une bonne série d'expériences sur la conductibilité des substances employées dans les vêtements [1].

[1] *Phil. Trans.*, 1792, p. 48.

Voici comment il procédait : Un thermomètre à mercure était suspendu dans l'axe d'un tube cylindrique de verre couronné d'un globe, de telle manière que le centre de la boule du thermomètre occupât le centre du globe ; l'espace entre la surface interne du globe et la boule était rempli de la substance dont on voulait déterminer le pouvoir conducteur. L'instrument était alors plongé d'abord dans de l'eau bouillante, puis dans un mélange réfrigérant de glace pilée et de sel ; et on notait le temps que le thermomètre mettait à descendre de 135° Fahrenheit. Ces temps sont donnés dans le tableau suivant :

Thermomètre entouré de	Secondes.
Soie tordue.	917
Fine charpie..	1032
Laine de coton..	1046
Laine de brebis.	1118
Taffetas	1169
Soie écrue	1264
Poil de castor.	1296
Édredon	1305
Poil de lièvre.	1312
Cendres de bois.	927
Charbon de bois	937
Noir de fumée..	1117

De toutes les substances examinées, le poil de lièvre est celle qui oppose le plus grand obstacle à la transmission de la chaleur.

La transmission de la chaleur est puissamment influencée par l'état mécanique du corps à travers lequel elle passe. La différence entre la soie tordue et la soie écrue, du tableau de Rumford, le prouve. La silice pure, à l'état de cristal de roche, est un meilleur conducteur que le bismuth ou le plomb ; mais si le cristal est réduit en poudre, la propagation de la chaleur à travers cette poudre est excessivement lente. La chaleur est abondamment transmise à travers le sel gemme ; elle l'est très-faiblement à travers le sel commun de table. Voici de l'asbeste, composée de certains silicates à l'état fibreux ; je l'étends sur ma main et je place dessus un boulet de fer chauffé au rouge ; vous voyez que je puis soutenir le boulet sans être brûlé. L'asbeste intercepte la chaleur. Que l'état de division de la substance oppose

un obstacle presque invincible à la transmission, on peut raisonnablement le croire ; car, la chaleur étant un mouvement, tout ce qui dérange la continuité de la chaîne moléculaire le long de laquelle le mouvement est conduit, doit affecter sa transmission. Dans le cas de l'asbeste, les fibres des silicates sont séparées les unes des autres par des espaces d'air ; donc, pour se propager, le mouvement a à passer du silicate à l'air, corps très-léger, et de nouveau de l'air au silicate, corps relativement lourd ; or, il est facile de comprendre que la transmission du mouvement à travers cette structure composée doive être très imparfaite. Dans le cas d'une fourrure d'animal, c'est plus spécialement encore ce qui arrive ; car, en elle, nous ne trouvons pas seulement des espaces d'air interposés entre les poils : ses poils eux-mêmes, différents des fibres de l'asbeste, sont de très-mauvais conducteurs. On a vu des laves couler sur une couche de cendre qui recouvrait un lit de glace, et la non-conductibilité des cendres a préservé la glace de la fusion. Les boulets chauffés au rouge sont portés jusqu'à la bouche des canons dans des brouettes de bois en partie remplies de sable. On emballe la glace dans de la sciure de bois pour l'empêcher de fondre ; du charbon en poudre est aussi un éminemment mauvais conducteur. Mais il y a des cas où la sciure de bois, la paille ou le charbon ne peuvent pas être employés avec sûreté, en raison de leur nature combustible. On peut recourir alors, avec avantage, à du plâtre pulvérisé. A l'état solide ou cristallisé, le plâtre est incomparablement plus mauvais conducteur que la silice, et l'on peut en conclure, avec sécurité, qu'à l'état pulvérisé son imperméabilité à la chaleur l'emportera de beaucoup sur celle du sable, dont chaque grain est bon conducteur. Une enveloppe de plâtre en poudre diminuerait notablement les pertes de chaleur des chaudières à vapeur.

L'eau tient habituellement en dissolution des matières minérales. En filtrant à travers la terre, elle dissout plus ou moins les substances avec lesquelles elle arrive en contact. Par exemple, dans les contrées calcaires, l'eau contient toujours une certaine quantité de carbonate de chaux ; on l'appelle alors *eau dure*. Le sulfate de chaux est aussi un des ingrédients communs

de l'eau. Dans l'évaporation, l'eau seule est entraînée, le minerai demeure, et souvent en quantités trop grandes pour rester en dissolution dans l'eau. Plusieurs sources sont fortement imprégnées de carbonate de chaux ; la conséquence en est que quand les eaux de pareilles sources arrivent à la surface et sont exposées à l'air, où elles peuvent s'évaporer partiellement, le carbonate est précipité et forme des incrustations à la surface des plantes et des pierres sur lesquelles l'eau coule. La même chose arrive dans l'ébullition de l'eau ; les substances minérales sont précipitées, et il y a à peine une chaudière dans Londres qui ne soit pas revêtue intérieurement d'une incrustation terreuse. Ces incrustations sont un grand obstacle au fonctionnement des chaudières à vapeur ; la croûte minérale est en effet assez mauvais conducteur, et elle peut devenir assez épaisse pour intercepter très-sensiblement le passage de la chaleur du foyer à l'eau. J'ai ici un exemple des maux causés par ce grave inconvénient. C'est une portion de la chaudière d'un bateau à vapeur presque entièrement perdu par suite de l'épuisement de son charbon. Pour le ramener au port, il fallut brûler son pont et tout ce qu'il y avait de bois à bord. L'examen fit découvrir une formidable incrustation dans l'intérieur de la chaudière. Elle était formée principalement de carbonate de chaux, dont la conductibilité si petite rendait nécessaire une dépense énorme de combustible pour engendrer la quantité requise de vapeur. On constate chaque jour que la lenteur avec laquelle plusieurs chaudières entrent en ébullition est due à une cause semblable.

Je désire maintenant mettre sous vos yeux un ou deux exemples de l'action des corps bons conducteurs pour empêcher l'accumulation locale de chaleur. J'ai ici deux sphères de même volume, toutes deux recouvertes de papier blanc, très-serré contre leur surface ; l'une est de cuivre, l'autre de bois. Je place une lampe à esprit-de-vin sous chacune d'elles, et nous verrons bientôt ce qui arrivera. Le mouvement de chaleur se communique naturellement à chaque boule, mais dans l'une il est rapidement conduit loin du point en contact avec la flamme, à travers la masse entière de la boule ; dans l'autre cette conduction rapide n'a pas

lieu, et la chaleur par conséquent s'accumule au point où la flamme frappe la boule ; voyez le résultat. J'enlève la boule de bois, le papier blanc est tout à fait réduit en charbon ; j'enlève l'autre boule, et loin d'être charbonné, le papier est humide à sa surface inférieure par la condensation de la vapeur aqueuse sortie de la lampe. Voici un cylindre couvert aussi de papier très-serré, je place son centre au-dessus de la flamme et je le fais tourner de manière que la flamme joue tout autour du cylindre ; vous voyez qu'une marque noire, bien définie, partage ce papier en deux portions dont l'une est charbonnée, tandis que l'autre ne l'est pas. Ce cylindre est moitié cuivre et moitié bois, et la marque noire trace la ligne de jonction des deux substances ; là où le papier recouvre le bois, il est charbonné ; là où il recouvre le cuivre, il n'est pas sensiblement altéré.

Si toute la force motrice de la balle d'une carabine ordinaire était communiquée à un lourd boulet de canon, elle lui imprimerait une petite quantité de mouvement. En supposant à la balle de fusil le poids de 60 grammes et une vitesse de 500 mètres par seconde, la force motrice de cette balle communiquée à un boulet de 50 kilogrammes lui imprimerait une vitesse de 10 mètres seulement par seconde. C'est ce qui arrive à une flamme : son mouvement moléculaire est très-intense, mais son poids est extrêmement petit, et si elle est en contact avec un corps pesant, l'intensité de son mouvement doit diminuer considérablement. Par exemple, j'ai ici une feuille de toile métallique à mailles assez larges pour permettre à l'air de la traverser avec la plus grande liberté, et un jet de gaz qui brûle avec une flamme brillante. Je pose la toile métallique sur la flamme ; vous vous imaginez peut-être que la flamme devra passer à travers ses mailles, mais non, il n'en passe absolument rien (fig. 69). La combustion est entièrement limitée à l'espace situé au-dessous de la toile. J'éteins la flamme, et je fais sortir du bec le courant de gaz non allumé. Je place la toile métallique à une certaine distance au-dessus du bec, le gaz maintenant, je le sais, passe librement à travers les mailles. J'allume le gaz au-dessus, la flamme jaillit, mais elle ne se propage pas au-dessous, et n'atteint

pas le bec (fig. 70). Vous avez entre le bec et la toile un espace obscur de 10 centimètres rempli de gaz, dans une condition éminem-

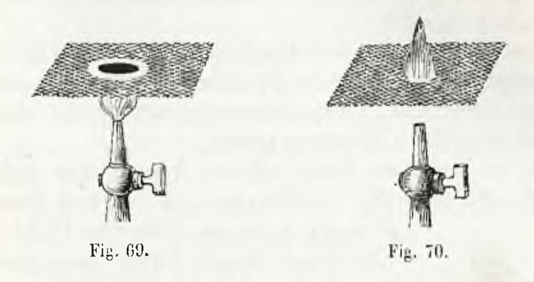


Fig. 69. Fig. 70.

ment favorable à l'ignition, et qui cependant ne s'enflamme pas. Vous le voyez donc, cette toile métallique, qui se laisse traverser librement par le gaz, intercepte la flamme. Et pourquoi? Une certaine chaleur est nécessaire pour allumer le gaz; or, en plaçant la toile métallique sur la flamme ou la flamme sur la toile métallique, vous transportez le mouvement de cette chose légère et mouvante à la toile en métal relativement pesante. L'intensité du mouvement moléculaire s'affaiblit considérablement en se communiquant à une plus grande masse de matière; elle est devenue si faible, en effet, qu'elle est impuissante à propager la combustion de l'autre côté de la toile.

Nous sommes tous, malheureusement, trop au courant des terribles accidents causés par les explosions des mines de houille. Vous savez que la cause de ces explosions est la présence d'un certain gaz, composé de carbone et d'hydrogène, naturellement engendré entre les couches de houille. Lorsque ce gaz est mêlé avec une quantité d'air suffisante, il s'enflamme avec explosion, le carbone du gaz s'unit à l'oxygène de l'air pour produire de l'acide carbonique, tandis que son hydrogène s'unit à l'oxygène de l'air pour produire de l'eau. Atteints par la flamme de l'explosion, les mineurs sont brûlés; mais lors même qu'ils ne perdent pas la vie de cette manière, ils sont souvent asphyxiés par l'acide carbonique produit. Le gaz primitif est le *grisou* du mineur, l'acide carbonique est sa *mofette*. Sir Humphry Davy,

après s'être assuré de l'action de la toile métallique, dont je vous ai rendus témoins, l'appliqua à la construction d'une lampe qui devait permettre au mineur de pénétrer sans danger dans une atmosphère explosive.

Avant l'introduction de la *lampe de sûreté*, le mineur devait se contenter de la lumière des étincelles produites par le choc de la pierre à feu et de l'acier, car on avait trouvé que ces étincelles étaient incapables d'allumer le grisou.

Davy environna une lampe ordinaire à huile d'un cylindre de toile métallique (fig. 71). Tant que cette lampe est alimentée d'air pur, la flamme brûle avec l'éclat ordinaire d'une flamme d'huile ; mais quand le mineur entre dans une atmosphère qui contient du *grisou*, sa flamme s'élargit et devient moins lumineuse, parce qu'au lieu d'être entretenue par l'oxygène pur de l'air, elle est maintenant en partie environnée de gaz inflammable. Cet affaiblissement de la flamme est pour lui l'avertissement de se retirer. Alors même que l'atmosphère explosive extérieure pénétrerait à travers les mailles de la toile jusqu'à la flamme intérieure, l'inflammation ne se propagerait pas en dehors de la lampe. Celle-ci peut être remplie d'une flamme à peine lumineuse sans qu'il y ait explosion. Mais un défaut dans la toile, la destruction de quelques fils commencée par l'oxydation et achevée par la flamme qui vient le frapper suffiraient à faire naître l'explosion. Un mouvement brusque de la lampe peut aussi déterminer mécaniquement la pénétration de la flamme à travers les mailles. En un mot, l'emploi de la lampe de Davy exige une certaine dose d'intelligence et de précautions. Malheureusement cette intelligence n'est pas toujours possédée, ces précautions ne sont pas toujours prises par le mineur, et les explosions surviennent

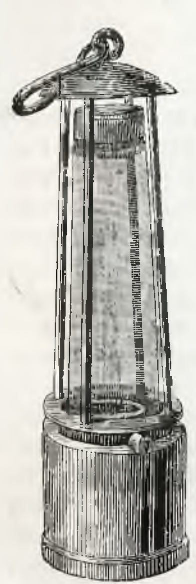


Fig. 71.

malgré la lampe de sûreté. Avant de permettre à un homme ou à un jeune garçon de descendre dans la mine, ne conviendrait-il pas de répéter sous ses yeux les expériences que nous venons de faire? De simples avis n'imposent pas forcément la prudence. Mais faites en sorte que le mineur ait clairement et vivement présente à l'esprit l'image physique de ce qui le menace, et vous le placerez sous une influence efficace qui l'avertira et le retiendra, alors que l'effet du simple *prenez garde* se serait tout à fait évanoui.

Un mot ou deux maintenant sur la conductibilité des liquides et des gaz. Rumford a fait sur ce sujet de nombreuses expériences qui témoignent à la fois de la clarté de sa conception et de son habileté d'exécution. Il admettait que les liquides étaient non conducteurs ; il distinguait nettement le transport de la chaleur par la convection de la conduction véritable, et afin d'empêcher l'élévation de température par convection, il chauffait les liquides à leur surface extérieure. Il trouva de cette manière que la chaleur d'un cylindre chaud de fer était impuissante à traverser en descendant une couche d'huile d'olive de 25 millimètres d'épaisseur ; et fit bouillir de l'eau dans un tube de verre, sur de la glace, sans fondre cette glace. Les dernières expériences de M. Despretz montrent, néanmoins, que les liquides possèdent un pouvoir de conduction réel, mais extrêmement faible. Rumford niait aussi la conductibilité des gaz, quoiqu'il connût bien leur convection[1]. Le sujet de la conductibilité des gaz a été récemment repris par M. le professeur Magnus, de Berlin, qui croit pouvoir conclure de ses expériences que le gaz hydrogène conduit la chaleur comme un métal.

L'action réfrigérante de l'air peut être mise élégamment en évidence de la manière suivante : je prends un fil de platine, roulé en hélice, et j'y fais passer un courant voltaïque jusqu'à ce qu'il soit chauffé au rouge clair ; je l'étends alors jusqu'à ce qu'il forme un fil droit ; son incandescence cesse à l'instant. Vous avez maintenant de la peine à le voir : cet effet est dû en-

[1] *Phil. Trans.*, 1792; *Essays*, vol. II, p. 56.

tièrement à ce que l'air froid arrive plus librement au contact du fil tendu. Voici encore un récipient R (fig. 72), dans lequel je puis faire le vide à volonté : une première tige métallique verticale *mn* est fixée au fond du récipient; une seconde tige *ab* passe à travers une garniture de cuivre étanche, et peut se mouvoir de haut en bas, de telle sorte qu'on puisse amener les extrémités des deux tiges à toute distance voulue l'une de l'autre. Les tiges, actuellement, sont unies par cinq centimètres de fil de platine *bm*, dont on peut élever la température à volonté au moyen d'un courant voltaïque. Voici une petite pile; j'établis mes communications; le fil est à peine assez lumineux pour être vu. C'est qu'il n'est traversé que par le courant d'un seul couple, et qu'il est environné d'air qui, sans aucun doute, emporte une portion de sa chaleur, Je fais le vide dans le récipient et le fil devient beaucoup plus brillant qu'auparavant. Je laisse rentrer l'air; le fil est d'abord tout à fait éteint et presque complétement noir; mais après que l'air a cessé d'entrer, il reprend sa faible incandescence primitive. Le courant d'air, en passant sur le fil et lui enlevant son incandescence, agit comme le courant que le fil lui-même établit en échauffant l'air en contact avec lui. Le refroidissement du fil dans les deux cas est dû à la convection, et non à une véritable conduction.

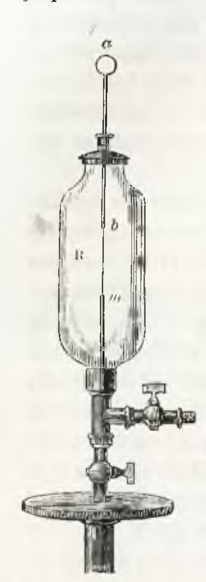


Fig. 72.

Le même effet est produit à un degré beaucoup plus considérable quand on substitue l'hydrogène à l'air. Nous devons à M. Grove cette intéressante observation qui est devenue le point de départ des recherches de M. Magnus. Le récipient est maintenant vide et le fil est presque chauffé à blanc. L'air ne pourrait que faire descendre la chaleur blanche au rouge vif; mais voyez ce dont l'hydrogène est capable. L'entrée de ce gaz

éteint totalement la fil; et même après que le récipient a été rempli entièrement de ce gaz, que le courant produit par son entrée a cessé, l'incandescence du fil ne se rétablit plus. Le courant électrique qui traverse ce fil est actuellement produit par deux couples; j'en ajoute un troisième, le fil rougit faiblement; cinq couples le rendent plus lumineux, mais même avec le courant de cinq couples, il n'est encore qu'au rouge vif. Si l'hydrogène n'était pas là, le courant qui passe maintenant à travers le fil le fondrait infailliblement. Constatons que c'est bien là le cas. Je commence à faire le vide; les premiers coups de piston produisent un effet à peine sensible; je continue à faire jouer les pistons, et voici que l'effet de la soustraction de l'hydrogène devient tout à fait visible.

Le fil blanchit et semble s'épaissir. Pour ceux qui sont à une certaine distance, il est gros maintenant comme une plume d'oie; son incandescence annonce qu'il est près du point de fusion. Je continue à pomper, la lumière s'est subitement évanouie; le fil est fondu. Ce pouvoir réfrigérant extraordinaire de l'hydrogène est ordinairement attribué à la mobilité de ses particules, qui fait que dans ce gaz les courants s'établissent beaucoup plus facilement que dans tout autre gaz. Mais M. le professeur Magnus considère le refroidissement du fil comme un effet réel de conduction. Pour gêner, sinon pour empêcher la formation des courants, il installa le fil de platine dans un tube étroit de verre qu'il remplissait d'hydrogène. Quoique dans ce cas le fil ne fût entouré que d'une simple couche de gaz, et qu'on ne pût pas admettre qu'il se formât des courants, dans le sens ordinairement attaché à ce mot, la mince couche d'hydrogène se montrait aussi apte à refroidir et à éteindre le fil, que quand il était tendu en travers d'un grand vase rempli de gaz. Il chauffa aussi un vase fermé par le haut, et trouva que la chaleur était plus rapidement transmise à un thermomètre placé à quelque distance au dessous de la source de chaleur quand le vase était rempli d'hydrogène, que lorsqu'il était rempli d'air. Il vit que cette différence de transmission existait même quand le vase était rempli de coton ou d'édredon non foulés. Ici, disait M. Magnus,

les courants ne peuvent pas se former ; la chaleur est donc transmise au thermomètre par une conduction véritable, et non par convection.

Si belles et si ingénieuses que soient ces expériences, je ne pense pas qu'elles établissent d'une manière tout à fait certaine la conductibilité de l'hydrogène. Concevons que le fil, dans la première expérience de M. le professeur Magnus, soit tendu le long de l'axe d'un large cylindre contenant de l'hydrogène et chauffé ; il devra y avoir convection dans le sens ordinaire du mot. Mais où va, en définitive, la chaleur ainsi dispersée? Elle se donne manifestement aux parois du cylindre, et si nous rétrécissons le cylindre, nous accélérerons évidemment la transmission. En rendant le cylindre de plus en plus étroit, nous finirons par revenir au tube étroit sans que la convection entre le centre et les parois s'arrête et cesse de produire le même effet de refroidissement qu'auparavant. La chaleur du gaz étant à chaque instant enlevée par la communication au tube pesant, il est sans cesse prêt à absorber de nouveau la chaleur du fil. Quant au vase échauffé par le haut, sa surface devrait être mathématiquement horizontale ; il faudrait, en outre, que l'application de la chaleur à cette surface fût parfaitement uniforme ; il serait enfin nécessaire, pour empêcher la convection, que les parois du vase fussent subitement dépouillées de toute chaleur. Même entre les interstices de l'édredon ou du coton, la mobilité convective de l'hydrogène se ferait encore sentir ; aussi, à tout prendre, je pense que la question expérimentale de la conductibilité des gaz est encore à résoudre.

LEÇON VIII

(13 MARS, 1862)

Le refroidissement est une perte de mouvement : à quoi ce mouvement est-il communiqué? — Expériences sur le son ayant trait à cette question. — Expériences sur la lumière ayant trait à cette question. — Les théories de l'émission et de l'ondulation. — Longueur d'ondes et nombre d'ondulations de la lumière. — Cause physique de la couleur. — Rayons invisibles du spectre. — Rayons calorifiques au delà du rouge. — Rayons chimiques au delà du bleu. — Réflexion de la chaleur rayonnante par des surfaces planes et courbes. — Lois les mêmes que celles de la lumière. — Miroirs conjugués.

APPENDICE. — Sur les flammes chantantes.

Nous atteignons aujourd'hui la limite de l'une des deux grandes divisions de notre sujet ; jusqu'ici nous avons étudié la chaleur associée aux corps solides, liquides ou gazeux. Nous l'avons trouvée capable de produire des changements de volume dans tous ces corps. Nous l'avons retrouvée réduisant les solides en liquides, et les liquides en vapeurs ; nous l'avons vue transmise à travers les solides par voie de conduction, et se distribuant elle-même à travers les liquides et les gaz par voie de convection. Nous avons maintenant à la suivre dans des conditions d'existence très-différentes de toutes celles que nous avons examinées jusqu'ici.

Je suspends dans l'air cette boule de cuivre chauffée ; vous la voyez incandescente, l'incandescence diminue, la boule devient obscure ; dans le langage populaire, la boule se refroidit. Fidèles à ce que nous avons dit de la nature de la chaleur, nous devons regarder ce refroidissement comme une perte de mouvement de

la part de la boule. Mais le mouvement ne peut pas se perdre sans se communiquer. Où donc passe le mouvement moléculaire de la boule? Vous répondrez peut-être dans l'air, et cela est vrai en partie; l'air passe sur la boule et s'élève en une colonne chaude, très-visible par projection sur l'écran, quand nous faisons passer le faisceau de lumière électrique à travers l'air chaud. Mais ce n'est ni la totalité, ni même la principale partie du mouvement moléculaire de la boule, qui se perd de cette manière. Si la boule était placée dans le vide, elle se refroidirait encore. Rumford, dont nous avons déjà tant parlé, imagina de suspendre un petit thermomètre, par un simple *fil de soie*, au milieu d'un globe de verre, dans lequel il avait fait le vide au moyen du mercure, et il trouva que les rayons calorifiques allaient à travers le vide du thermomètre au dehors ou du dehors au thermomètre; ce qui prouvait que la transmission de la chaleur avait lieu indépendamment de l'air. Davy, avec un appareil que j'ai ici devant moi, montrait que les rayons de chaleur de la lumière électrique passaient librement à travers le vide de la machine pneumatique, et nous pouvons répéter son expérience pour nous tout à fait capitale. Je prends simplement le récipient dont je me suis servi dans notre dernière leçon (fig. 72) ; j'enlève ce qui reste du fil de platine, alors fondu ; j'attache à l'extrémité de chacune des deux baguettes, *m n*, *a b*, un crayon de charbon de cornue à gaz, je fais le vide dans le récipient ; j'amène les pointes de charbon en contact, et je fais passer un courant électrique d'une pointe à l'autre. Au moment où je sépare un peu les pointes, la lumière électrique jaillit, et voici que la pile thermo-électrique est prête à recevoir une partie des rayons. L'aiguille du galvanomètre s'enfuit, et sa fuite est due aux rayons qui ont traversé le vide.

Mais si ce n'est pas à l'air, à quoi donc passe le mouvement de la boule qui se refroidit? Une suite de degrés faciles à franchir, nous rapprochera de la réponse à cette question. On fit un pas considérable dans la science le jour où l'on se fit pour la première fois une idée nette de la manière dont le son est transmis à travers l'air ; et elle était très-importante, l'expérience par la-

quelle, en 1705, Haukbee prouva devant la Société royale que le son *ne peut pas* se propager dans le vide. Mon but, en ce moment, est de rendre évidente à vos yeux cette transmission des vibrations du son à travers l'air. Voici une cloche tournée sens dessus dessous, et portée par un support. Je passe un archet de violon sur son bord, vous en entendez le son ; la cloche vibre. Si je verse du sable sur son fond un peu aplati, il se disposera de manière à dessiner une figure régulière; et si je la remplis d'eau, je verrai la surface de l'eau sillonnée par les plus belles rides. Ces rides montrent que la cloche, quand elle émet un son, se partage en quatre portions vibrantes, séparées les unes des autres par quatre lignes sans vibrations. Voici une feuille de papier à décalquer, bien tendue sur son cercle, de manière à former une sorte de tambour fragile. Je la pose au-dessus de la cloche vibrante, mais sans la toucher, vous entendez le frémissement de la membrane. Elle est un peu trop lâche, aussi vais-je la tendre un peu plus en l'approchant du feu, et répéter l'expérience. Vous n'entendez plus seulement un frémissement, mais bien un son musical éclatant qui s'ajoute au son de la cloche. J'élève et j'abaisse la membrane; je la porte à droite, à gauche; vous entendez le son se renforcer ou s'affaiblir. Voici un tambour plus petit, que je fais tourner autour de la cloche, en tenant la membrane verticale; il résonne avec bruit quand elle n'est plus qu'à un centimètre de distance de la cloche. Le mouvement de la cloche, communiqué à l'air, est transmis par l'air à la membrane, qui devient à son tour un corps sonore.

J'ai ici deux plaques de cuivre, A B (fig. 75), réunies par cette tige métallique. J'ai assombri les plaques en les bronzant, et sur chacune d'elles, je verse une certaine quantité de sable blanc. Je saisis maintenant par son milieu, entre les doigts et le pouce de la main gauche, la tige métallique, et la maintenant verticale, je frotte sa moitié supérieure avec un morceau de flanelle, sur lequel j'ai fait tomber un peu de résine pulvérisée. Vous entendez le son; mais voyez comment le sable se comporte. Au premier frottement exercé par mes doigts, il saute et s'arrondit en une série d'anneaux concentriques, que vous devez tous aper-

cevoir. Je répète l'expérience en opérant plus doucement ; vous entendez un son net, doux, musical; vous voyez en même temps le sable frémir, revenir par degrés aux lignes qu'il avait d'abord dessinées : et voici que les cercles sont aussi nettement tracés à la surface du disque inférieur que si on les avait fait naître avec un pinceau de poil de chameau. Sur le disque supérieur, vous voyez la même série de cercles concentriques. De fait, les vibrations imprimées par moi à la tige se communiquent aux deux disques, et partagent chacun d'eux en une série de segments vibrants, et séparés les uns des autres par des lignes sans vibration, sur lesquelles le sable trouve à se fixer.

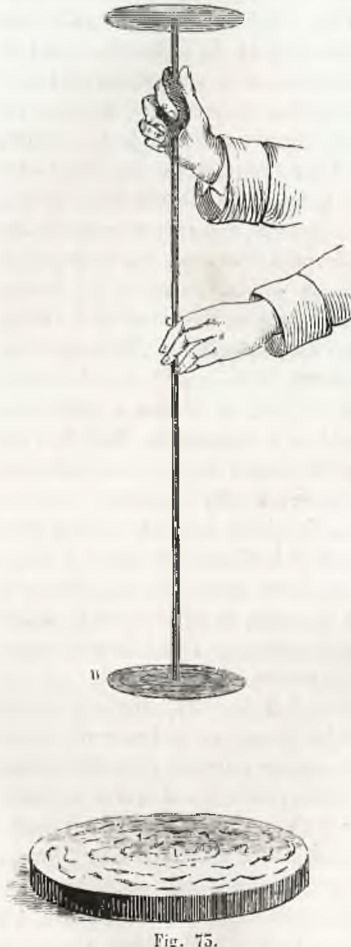


Fig. 75.

Permettez maintenant que je vous montre la transmission de ces mêmes vibrations à travers l'air. Sur le parquet j'installe ce tambour de papier, D, saupoudré uniformément de sable de couleur sombre ; je puis à volonté monter sur la table et m'élever même à la hauteur du plafond, sans cesser de produire l'effet dont je veux vous rendre témoins. Diri-

geant la tige qui réunit mes plaques du côté du tambour du papier, je la frotte vigoureusement avec la flanelle saupoudrée de résine. Voyez ce qui arrive. Une seule passe a fait dessiner au sable une figure réticulée. Le son produit un effet tout semblable sur le tambour de l'oreille; la membrane du tympan est amenée à vibrer de la même manière que le papier du tambour; et ses vibrations transmises aux nerfs auditifs d'abord, puis des nerfs auditifs au cerveau, éveillent en nous la sensation du son.

Voici un exemple encore plus frappant de cette transmission du son à travers l'air. En permettant à un jet de gaz de sortir par le petit orifice de ce tube, j'obtiens une flamme élancée, que je réduis, en tournant le robinet, à n'avoir qu'un peu plus d'un centimètre de hauteur.

J'introduis la flamme dans ce tube de verre, A B (fig. 74), long de 12 pouces.

Maintenant, avec votre permission, je m'adresserai à cette flamme, et je suis assez habile pour donner à ma voix l'intonation voulue; je suis sûr qu'elle me répondra, que je lui ferai rendre spontanément un son mélodieux, et qu'elle continuera de chanter aussi longtemps que le gaz continuera de brûler. Le bec est maintenant disposé dans l'intérieur du tube, qui le recouvre sur une hauteur d'environ 5 centimètres. Si je l'enfonçais davantage, la flamme se mettrait à chanter d'elle-même, comme dans le cas bien connu de l'harmonica à hydrogène; mais, avec les précautions prises, elle ne chantera que lorsque je lui aurai dit de le faire. J'émets maintenant un son, s'il n'est pas mélodieux, vous daignerez m'excuser. La flamme ne répond pas; je ne lui ai pas parlé sa langue. Laissez-moi essayer de nouveau; je fais rendre à ma voix un son un peu plus élevé; voici que la flamme tend son petit gosier, et chacun dans ce vaste auditoire entend le son qu'elle rend. Je me tais et la fais taire. Je me place à une plus grande distance, et maintenant que je sais lui donner le ton, l'expérience réussira à coup sûr. A plus de huit ou dix mètres, je la ferai chanter quand il me plaira. Je m'arrête, je lui tourne le dos; je donne la même note qu'au-

paravant ; voyez comme elle obéit à ma voix. Quand j'appelle, elle répond. Après bien peu d'exercice, j'ai pu commander à la flamme de chanter ou de se taire ; elle a obéi aussitôt à mes injonctions. Exemple frappant du transport des vibrations de l'organe de la voix à travers l'air, et de leur communication à un corps qui est éminemment sensible à leur action [1].

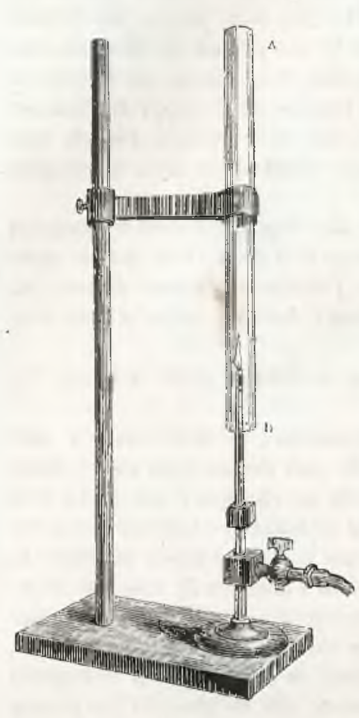


Fig. 74.

Pourquoi ai-je fait ces expériences sur le son ? Uniquement pour vous donner des idées nettes relativement à ce qui a lieu dans le cas de la chaleur ; pour vous conduire du palpable à l'impalpable ; de la région des sens à la région des théories physiques.

Après que les physiciens eurent reconnu avec certitude la manière dont le son est produit et transmis, l'analogie amena quelques-uns d'entre eux à supposer que la lumière pouvait être produite et transmise d'une manière à peu près semblable. Et peut-être, dans toute l'histoire de la science n'y eut-il jamais de question plus chaudement controversée que celle-ci. Sir Isaac Newton admettait que la lumière résultait de petites particules

[1] Quoique n'appartenant point à notre sujet présent, un si grand nombre de personnes ont montré de l'intérêt pour cette expérience, que j'ai été porté à réimprimer, dans l'appendice de cette leçon, deux courts mémoires dans lesquels elle est plus amplement décrite.

lancées par des corps lumineux ; c'était la fameuse théorie de l'émission. Huyghens, le contemporain de Newton, trouva de grandes difficultés à concevoir cette canonnade de particules, et à admettre qu'elles pussent s'élancer avec une vitesse inconcevable à travers l'espace sans se troubler l'une l'autre. Cet homme célèbre avait conçu l'idée que la lumière était produite par des vibrations semblables à celles du son. Euler soutint Huyghens, et l'un de ses arguments, quoique assez peu physique, est si subtil et si curieux que je tiens à le répéter ici. Il considère nos divers sens, et la manière dont ils sont affectés par les objets extérieurs. « Pour ce qui regarde les odeurs, « dit-il, nous savons qu'elles sont produites par des particules matérielles qui s'échappent d'un corps volatil. Quand il s'agit de l'ouïe, rien n'est détaché du corps résonnant, et dans le cas du tact, nous devons toucher le corps lui-même. La distance à laquelle nos sens perçoivent la présence des corps est, dans le cas du toucher, une distance nulle, dans le cas de l'odorat, une petite distance, dans le cas de l'ouïe, une distance considérable, et dans le cas de la vue, la distance est la plus grande de toutes. Il est donc très-probable que le mode de propagation est le même pour le son et pour la lumière, que les odeurs et la lumière se propagent de la même manière ; que les corps lumineux doivent se comporter, non comme des substances volatiles, mais comme des corps sonores. »

L'autorité de Newton écrasait ses contradicteurs, et la théorie des ondulations n'eut aucune chance de tenir tête à sa rivale la théorie de l'émission, tant qu'un homme de génie n'eut pas pris en main sa défense dans l'intérieur de ces murs. C'est au docteur Thomas Young, qui fut primitivement professeur de philosophie naturelle dans cette Institution, que revient l'immortel honneur d'avoir refoulé le flot de l'autorité, et d'avoir établi sur une base assurée, la théorie des ondulations. De grosses pierres ont été apportées par d'autres à ce noble édifice, mais la part d'Young sera difficilement surpassée. Il fut conduit à ses conclusions, relativement à la lumière, par une série de recherches sur le son. Comme nous, au moment présent, il s'est élevé du connu à l'inconnu, du palpable à l'impalpable. Ce sujet a été éclairci et

enrichi par les travaux d'hommes de génie, même depuis le temps de Young; mais je n'associerai ici qu'un seul nom au sien; un nom qui, dans le sujet que nous traitons ne saurait jamais être oublié, le nom d'Augustin Fresnel.

D'après les notions aujourd'hui universellement reçues, la lumière consiste, avant tout, en un mouvement vibratoire des particules des corps lumineux. Mais comment ce mouvement est-il transmis à nos organes de la vue? Le son a l'air pour milieu ou pour véhicule; or une longue pondération des phénomènes de la lumière, ainsi que des expériences délicates et concluantes, exécutées dans l'intention expresse de vérifier une idée préconçue, ont conduit les physiciens à cette conclusion, que l'espace est occupé par une substance presque infiniment élastique, à travers laquelle les pulsations de la lumière font leur chemin. Il importe grandement que sur ce point nos conceptions soient parfaitement nettes. L'intelligence ne connaît pas de différence entre le grand et le petit; il est tout aussi aisé, en tant qu'il s'agit d'acte de l'intelligence, de se représenter les vibrations d'un atome que celles d'un boulet de canon; nous n'avons pas plus de difficultés à concevoir l'éther, c'est ainsi qu'on l'appelle, qui remplit l'espace, que d'imaginer ce même espace rempli de gelée. Imaginez-vous donc ces atomes vibrants; et concevez que leurs vibrations communiquées à l'éther dans lequel ils flottent, soient propagées sous forme d'onde à travers cet éther; ces ondes entrent dans la pupille, traversent le globe de l'œil, et se brisent sur la rétine au fond de l'œil. Ce choc, souvenez-vous-en, est aussi réel, et aussi véritablement mécanique que le choc des vagues de la mer contre le rivage. Leurs mouvements communiqués d'abord à la rétine suivent le nerf optique sur toute leur longueur, et arrivent au cerveau où ils nous donnent la conscience de la lumière.

Voici une lampe électrique, bien connue de vous tous; sur l'écran dressé devant vous je projette l'image des pointes des charbons incandescents qui produisent la lumière électrique. Je vais d'abord appuyer les pointes l'une contre l'autre et ensuite les séparer. Voyez ce qui arrive. C'est d'abord le point de contact qui devient lumineux, puis l'incandescence descend à une

certaine distance le long de la tige de charbon. Cette propagation, vous le savez, est un effet de conduction réelle de mouvement. J'interromps le circuit. Les pointes continuent à être incandescentes pendant un moment; la lumière s'éteint; les pointes de charbon sont à présent tout à fait obscures, mais ont-elles cessé de rayonner? En aucune façon. Il part en ce moment de ces pointes un rayonnement abondant, qui, quoique impuissant à affecter sensiblement les nerfs optiques de la vision, sont très-aptes à affecter d'autres nerfs de l'organisme humain. Aux yeux du physicien qui dans ces études fait abstraction de la sensation, ces radiations obscures sont exactement de même espèce que celles qui produisent l'impression de lumière. Vous devez donc vous figurer les particules du corps chauffé constituées à l'état de mouvement; vous devez vous figurer ce mouvement communiqué à l'éther environnant, et transmis à travers cet éther avec une vitesse égale, nous avons les plus fortes raisons de le croire, à la vitesse de la lumière. Ainsi lorsque, dans un jour froid, vous remuez votre feu et que vous exposez vos mains glacées à son influence, la chaleur que vous sentez est due au choc de ces sphérules éthérées contre votre peau; elles mettent les nerfs en mouvement, et la conscience intérieure de ce mouvement est ce que nous appelons vulgairement chaleur. Notre tâche dans les leçons qui nous restent, sera d'examiner la chaleur sous cette forme de chaleur rayonnante.

Pour nous aider dans ces recherches, nous avons en main notre inestimable pile thermo-électrique, dont la face est maintenant enduite de noir de fumée, puissant absorbant de la chaleur rayonnante. Je la tiens en face de la joue de mon préparateur; cette joue est un corps rayonnant; voyez l'effet produit par ses rayons; la pile les boit, ils engendrent de l'électricité, et l'aiguille du galvanomètre se meut vers 90°. J'éloigne la pile de la source de chaleur, je laisse l'aiguille revenir au repos, et je dresse ce morceau de glace en face de la pile. Vous avez une déviation dans le sens opposé. On dirait que des rayons de froid ont frappé la pile. Mais vous savez que dans ce cas la pile est le corps chaud, et qu'il rayonne sa chaleur vers la glace; la face

de la pile est ainsi refroidie, et l'aiguille, comme vous voyez, s'est élancée à 90° du côté du froid. Notre pile n'est donc pas bonne seulement pour l'examen de la chaleur qui lui est communiquée par le contact direct, elle se prête tout aussi bien à l'examen de la chaleur rayonnante. Appliquons-la donc à la plus importante des recherches. Examinons par son moyen la distribution du pouvoir thermal dans le spectre électrique.

Permettez en premier lieu que je vous montre ce spectre. Je le fais en envoyant une tranche de pure lumière blanche partie de la fente *o* (fig. 75), à travers le prisme, *a*, *b*, *c*, formé de lames

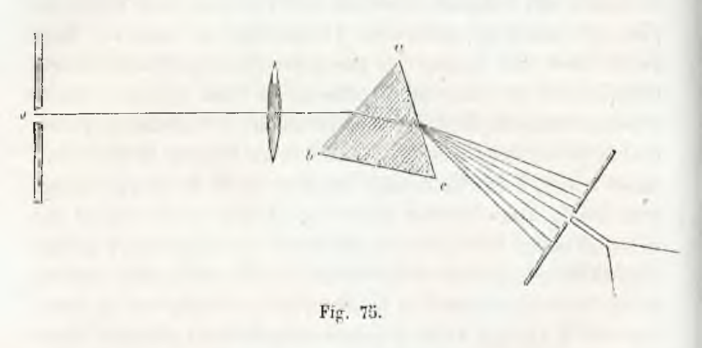


Fig. 75.

planes de verre, renfermant entre elles du bisulfure de carbone liquide. Il étale plus les couleurs que le verre, et c'est la seule raison pour laquelle je l'emploie préférablement au verre. Vous voyez que le faisceau de lumière blanche est comme démêlé et réduit dans les couleurs qui le composent ; voyez ce rouge de feu, cet orangé vif, ce jaune éblouissant, ce vert brillant, ces nuances diverses de bleu ou cet espace bleu, ordinairement subdivisé en indigo et violet. Je vais maintenant faire passer graduellement une pile thermo-électrique d'une construction particulière à travers toutes ces couleurs successivement, pour éprouver leur pouvoir calorifique, et je vous demanderai d'observer l'aiguille du galvanomètre qui doit déclarer la grandeur de ce pouvoir.

Dans ce but, j'ai ici (fig. 76) un bel appareil, inventé par Melloni, et que M. Ruhmkorff a exécuté avec son habileté accou-

fumée [1]. Remarquez cette plaque polie de cuivre, A B, attachée à une tige, et cette tige montée sur une barre horizontale, qui, au moyen d'une vis, reçoit le mouvement qu'on veut lui communiquer. En tournant cette manivelle d'ivoire dans un sens, je fais avancer la plaque de cuivre; en la tournant en sens contraire, je la fais reculer; ce mouvement est si délicat et si lent, que je puis, avec facilité et certitude, faire avancer l'écran de moins d'un centième de millimètre. Vous apercevez dans le milieu de cette plaque une fente verticale étroite, et derrière la fente un espace obscur. Cet espace obscur est la face noircie d'une pile thermo-électrique, P, dont les éléments sont disposés sur une seule rangée, et non plus de manière à former un parallélipipède rectangle comme dans notre autre pile. Je vais faire tomber sur cette fente les bandes isolées du spectre; chacune d'elles communiquera à la pile ce qu'elle possède de chaleur, et cette quantité de chaleur sera marquée par l'aiguille de notre galvanomètre.

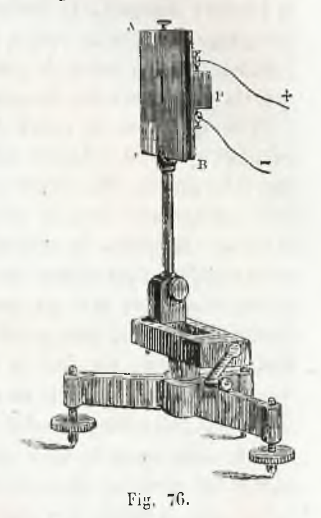


Fig. 76.

Un spectre petit mais brillant tombe actuellement sur la plaque A B, mais la fente est restée tout à fait en dehors de ce spectre. Je tourne la manivelle, et la fente s'approche graduellement de l'extrémité violette du spectre; la lumière violette tombe maintenant sur la fente, mais l'aiguille ne se meut pas d'une manière sensible. Je passe à l'indigo, l'aiguille demeure encore en repos; le bleu aussi ne manifeste aucune action. Je passe au vert, l'aiguille se déplace à peine; j'arrive au jaune; le déplacement de l'aiguille est peut-être devenu visible pour la première

[1] Il m'a été gracieusement prêté par M. Gassiot.

fois ; mais la déviation est faible, quoique la pile plonge dans *la partie la plus lumineuse du spectre*[1]. Je passe à l'orangé, qui est moins lumineux que le jaune, et, vous le constatez, quoique la lumière diminue, la chaleur augmente ; l'aiguille s'éloigne davantage. J'arrive au rouge, moins lumineux que l'oranger, et j'obtiens, vous le voyez, le plus grand pouvoir thermo-électrique que les parties visibles du spectre aient encore manifesté.

Cette apparence de rouge feu pourrait peut être vous faire supposer qu'il est naturel à cette couleur d'être plus chaude que toutes les autres. Mais faites attention. Je vais faire placer ma fente entièrement hors du spectre, tout à fait au delà du rouge extrême. Regardez le galvanomètre ! L'aiguille est promptement rejetée jusque contre ses arrêts. Nous avons donc ici un spectre chaud que nous ne pouvons pas voir, et dont le pouvoir thermique est bien plus grand que celui de toutes les parties visibles du spectre. En effet, la lumière électrique dont nous nous servons, émet une infinité de rayons rendus convergents par la lentille, et réfractés par notre prisme, qui forment la prolongation de notre spectre, mais qui sont absolument impuissants à exciter les nerfs optiques, et à produire la vision. Il en est de même avec le soleil ; son globe est riche de ces rayons obscurs, et quoiqu'ils soient pour la pluspart interceptés par notre atmosphère, une foule d'entre eux arrivent encore jusqu'à nous. C'est au grand William Herschell que nous sommes redevables de leur découverte.

Nous prouvons ainsi que le spectre s'étend du côté du rouge bien au delà de ses limites visibles ; et si, au lieu d'être obligé de me servir de lentilles et de prismes de verre, j'étais assez heureux pour posséder des lentilles et des prismes de sel gemme, je pourrais, comme Melloni l'a fait, prouver que ces rayons s'étendent beaucoup plus loin que je ne puis vous le montrer maintenant. En effet, le verre, quoique sensiblement transparent pour la lumière, est dans une grande proportion opaque pour les rayons obscurs ; au lieu d'arriver à l'écran, ils restent pour la plus grande partie logés dans le verre.

[1] Je me sers ici d'un grand galvanomètre d'amphithéâtre.

Le spectre visible marque donc simplement un intervalle d'action rayonnante, dans lequel les radiations sont dans un tel rapport avec notre organisation, qu'elles excitent en nous l'impression de lumière ; au delà de cet intervalle, *dans les deux directions*, à droite et à gauche, le pouvoir rayonnant continue à s'exercer, mais les rayons émis sont obscurs ; ceux qui partent d'au delà du rouge sont aptes à produire de la chaleur, tandis que ceux qui partent d'au delà du violet sont aptes à provoquer l'action chimique. Ces derniers rayons peuvent être rendus actuellement visibles, ou, pour m'exprimer plus exactement, les ondulations ou les ondes qui viennent se briser maintenant contre l'écran, en dehors du violet, et qui sont dispersées par lui de manière à frapper les yeux de chacune des personnes présentes, sans pouvoir toutefois exciter dans leurs yeux la sensation de la vision, ces ondes, dis-je, peuvent être amenées à venir se briser contre un autre corps, et à le faire participer à leur mouvement, de manière à convertir l'espace obscur au delà du violet en un espace brillamment illuminé. J'ai ici le corps apte à opérer cette métamorphose. La moitié inférieure de cette feuille de papier a été mouillée avec une solution de sulfate de quinine, tandis que la moitié supérieure est restée dans son état naturel. Je vais tenir la feuille de telle sorte que la ligne qui sépare sa moitié préparée de la moitiée non préparée, soit horizontale, et coupe le spectre en deux parties égales ; la moitié supérieure restera inaltérée, et vous pourrez lui comparer la moitié inférieure, sur laquelle j'espère trouver le spectre visible prolongé au delà de ses limites premières. Voyez l'effet produit . une bande splendide de lumière fluorescente s'étend sur une longueur de plusieurs centimètres, là où un moment auparavant tout était ténèbres. Je retire le papier préparé, et la lumière disparaît. Je le remets en place, et la lumière brille de nouveau, vous montrant de la manière la plus éclatante que les limites visibles du spectre ordinaire ne sont en aucune manière les limites de l'action rayonnante.

Je plonge mon pinceau dans la solution de sulfate de quinine, et je le passe sur le papier ; partout où la solution tombe, la lu-

mière surgit. L'existence de ces rayons ultra ou extra-violets est connue depuis longtemps ; ils étaient familiers à Thomas Young, qui les a soumis à des expériences réelles ; mais c'est à M. le professeur Stokes que nous sommes redevables de recherches complètes sur ce sujet. C'est lui qui a rendu visibles ces rayons invisibles, comme nous venons de le faire.

Comment arriver à concevoir ces rayons visibles et invisibles qui couvrent ce large espace sur l'écran ? Pourquoi quelques-uns sont-ils visibles, tandis que d'autres ne le sont pas ? Pourquoi ceux qui sont visibles se distinguent-ils par des couleurs diverses ? Y a-t-il quelque chose que nous puissions saisir dans les ondulations qui produisent les couleurs, et à quoi, comme à une cause physique, nous devions attribuer la couleur ? Remarquez-le d'abord ; le faisceau entier de lumière blanche est rejeté de côté ou réfracté par le prisme, mais le violet est plus rejeté que l'indigo, l'indigo plus que le bleu, le bleu plus que le vert, le vert plus que le jaune, le jaune plus que l'orangé, et l'orangé plus que le rouge. Ces couleurs sont diversement réfrangibles, et c'est de l'inégale réfrangibilité que dépend la possibilité de leur séparation. A chaque degré particulier de réfraction appartient une couleur déterminée et non pas une autre. Mais comment une lumière d'un certain degré de réfrangibilité peut-elle produire la sensation du rouge, et celle d'un autre degré la sensation du vert ? Ceci nous conduit à considérer de plus près la cause de ces sensations.

Un retour vers les phénomènes du son ne contribuera pas peu à rendre cette discussion plus facile.

Représentons-nous clairement une corde de harpe en vibration, allant et revenant tour à tour ; elle avance, elle force les particules d'air qu'elle rencontre à se presser les unes contre les autres, et produit ainsi une *condensation* d'air. Elle revient sur ses pas, et les particules d'air, d'abord comprimées, qu'elle laisse derrière elle, se détendent et occupent un plus grand espace. En d'autres termes, il se fait derrière la corde en retour une *raréfaction* de l'air. La corde avance de nouveau et produit la condensation comme auparavant ; elle revient encore et produit

une raréfaction. La condition de l'air à travers lequel le son de la corde se propage est donc une succession régulière de condensations et de raréfactions, qui marchent avec une vitesse d'environ 330 mètres par seconde.

L'ensemble de la condensation et de la raréfaction constitue ce qu'on appelle une pulsation ou *onde sonore*, et la longueur de l'onde est la distance du milieu de la condensation au milieu de la raréfaction. Les ondes se succèdent naturellement l'une à l'autre. Une longueur de l'onde est aussi mesurée par la distance du centre d'une condensation au centre de la condensation suivante. Cela posé, plus une corde vibre rapidement, plus rapidement les pulsations se succèdent l'une à l'autre, et plus courte en même temps est la longueur de chaque onde individuelle. C'est de ces différences de longueurs d'onde que dépend en musique le *ton* du son. Si un violoniste veut produire une note plus aiguë, il raccourcit la corde en pressant le doigt sur elle ; par là il augmente la rapidité de la vibration. Si le point où la pression de son doigt s'exerce partage exactement en *deux parties égales* la longueur de la corde, il obtient l'*octave* de la note émise quand la corde vibrera tout entière. Dans les chœurs on choisit des enfants pour produire les notes aiguës ; des hommes pour produire les notes basses. La raison en est que le larynx d'un enfant vibre plus rapidement que celui d'un homme ; de même, le bourdonnement d'un cousin est plus aigu que celui d'un cerf-volant, parce que l'insecte plus petit peut expédier à l'oreille un plus grand nombre de battements par seconde.

Nous avons maintenant éclairé la route qui nous conduira à la perception claire de la cause physique de la couleur. Ce spectre est aux yeux ce que la gamme est aux oreilles ; ses différentes couleurs représentent des notes de *tons* différents. Les vibrations qui produisent l'impression de rouge sont plus lentes, et les ondes éthérées qu'elles engendrent plus longues que celles qui produisent l'impression de violet ; les autres couleurs sont excitées par des ondes de longueurs intermédiaires. Les longueurs d'ondes du son et de la lumière, les nombres de pulsations qu'elles impriment respectivement aux oreilles et aux

yeux, ont été exactement déterminés. Entrons ici dans un calcul simple. La lumière parcourt l'espace avec une vitesse de 308 000 kilomètres par seconde. Réduisant ce nombre en centimètres, nous trouvons le nombre de 30 800 000 000. Maintenant on a trouvé que 16 666 ondes de lumière rouge placées à la suite les unes des autres feraient un centimètre; multipliant le nombre de centimètres que contiennent 300 000 kilomètres par 16 666, nous trouvons le nombre d'ondes de lumière rouge contenu dans 306 030 kilomètres; ce nombre est 496 774 193 548 548. *Toutes ces ondes entrent dans l'œil en une seconde.* Pour produire l'impression de rouge sur le cerveau, la rétine doit être frappée avec cette vitesse vraiment incroyable. Pour produire l'impression de violet, le nombre des pulsations doit nécessairement être beaucoup plus grand encore. Il faut 57 500 ondes de violet pour remplir un pouce, et six cent quatre-vingt dix-neuf millions de millions de chocs par seconde pour donner la sensation de cette couleur. Les autres couleurs du spectre, ainsi que nous l'avons déjà dit, montent graduellement de ton du rouge au violet.

Mais nous avons au delà du violet des rayons de ton trop élevé, et au delà du rouge des rayons de ton trop bas pour qu'ils puissent rester visibles. Les phénomènes de la lumière sont encore ici en parallélisme complet avec les phénomènes du son. Si cela n'impliquait pas contradiction, nous pourrions dire qu'il y a des sons musicaux trop aigus et des sons musicaux trop graves pour pouvoir être entendus. Plus exactement, il est des ondes envoyées à travers l'air par les corps vibrants, qui, quoique frappant l'oreille par successions régulières, sont impuissantes à exciter la sensation d'un son musical. Les insectes, probablement, entendent des sons qui échappent entièrement à notre oreille, et pour ne parler que de nous, telle note d'une acuité perçante pour une oreille humaine, peut n'être pas du tout entendue par une autre. Dans le domaine à la fois du son et de la lumière, nos organes de la vue et de l'ouïe embrassent une certaine échelle pratique, en dehors de laquelle, des deux côtés, et quoique la cause objective existe, nos nerfs cessent d'être influencés par elle.

Si donc je dresse devant vous cette boule de cuivre chauffée

au rouge, et que je vous fasse assister à l'extinction de la lumière, vous aurez une idée parfaitement claire de ce qui arrive. Les atomes de la boule oscillent, mais ils oscillent dans un milieu résistant sur lequel leur force s'exerce, et qui la transmet de tous côtés avec une vitesse inconcevable. Les oscillations capables de produire de la lumière sont maintenant épuisées; la boule est tout à fait obscure, quoique ses atomes oscillent toujours, et que leurs oscillations soient encore reçues et transmises de tous côtés par l'éther. La boule se refroidit à mesure qu'elle perd ainsi son mouvement moléculaire; mais le refroidissement auquel on la soumet, quelque prolongé qu'il soit, ne saurait la priver complétement de son mouvement; c'est-à-dire que tous les corps, quelle que puisse être leur température, rayonnent de la chaleur. Du corps de chacun des individus ici présents, partent des ondes, dont quelques-unes vont frapper la boule qui se refroidit, pour lui rendre en partie le mouvement qu'elle perd. Mais le mouvement que la boule reçoit ainsi est moindre que celui qu'elle communique, et la différence entre ces deux mouvements exprime la perte éprouvée par la boule. Aussi longtemps que cet état de choses continuera, la boule continuera de montrer une température sans cesse décroissante; sa température s'abaissera jusqu'à ce que la quantité de mouvement qu'elle émet soit égale à la quantité de mouvement qu'elle reçoit; à partir de ce point sa température devient constante. Ainsi, quoique vous ne sentiez pas que vous recevez de la chaleur, quand vous êtes devant un corps à la même température que vous, il y a échange de rayons entre vous et lui. Chaque atome superficiel de chaque masse envoie ses ondes, qui croisent celles qui viennent de la direction opposée, et chacune de ces ondes garde son individualité au milieu de l'encombrement de ses compagnes. Quand la somme du mouvement reçue est plus grande que la somme de mouvement donnée, il y a échauffement; quand la somme de mouvement donné est plus grande que la somme de mouvement reçu, il y a refroidissement. Telle est la théorie des échanges de Prévost, exprimée dans le langage de la théorie des ondes.

Consacrons le reste de cette leçon à la manifestation expéri-

mentale de l'analogie entre la lumière et la chaleur rayonnante, dans l'acte de la réflexion. Vous remarquez que quand je place ma pile thermo-électrique en face de mon préparateur, je l'arme d'un cône à large ouverture que je n'employais pas dans mes premières expériences. Ce cône est argenté intérieurement, et a pour effet d'accroître l'action des radiations faibles, en les faisant converger sur la face de la pile thermo-électrique ; il agit ainsi par réflexion; au lieu de passer loin de la pile, comme elles le feraient si l'on éloignait le réflecteur, elles rencontrent la surface argentée qui les renvoie sur la pile. On met en évidence, comme il suit, l'accroissement d'effet dû à la présence du cône. J'installe la pile avec son réflecteur à cette extrémité de la table, et à une distance de deux à trois mètres, je place cette boule de cuivre, chauffée mais non plus au rouge; c'est à peine si vous apercevez un léger mouvement de l'aiguille du galvanomètre. Sans rien déranger, j'arme la pile de son réflecteur ; aussitôt l'aiguille va à 90° indiquant une notable augmentation d'effet.

La loi de cette réflexion est exactement la même que celle de la lumière. Voyez ce cylindre lumineux, solide en apparence, qui sort de notre lampe électrique, et qui marque si nettement sa trace sur la poussière de notre chambre obscure. Je prends dans ma main un miroir et je fais tomber sur lui le faisceau lumineux ; le faisceau rebondit sur le miroir et va frapper maintenant le plafond. Ce faisceau horizontal est le faisceau incident, cet autre faisceau vertical est le faisceau réfléchi, et la loi de la lumière, comme beaucoup d'entre vous le savent, est que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Les faisceaux incident et réfléchi forment maintenant un angle droit, et lorsqu'ils sont dans cette position, je puis être assuré qu'ils forment tous deux avec la perpendiculaire au miroir, un angle de 45°.

J'installe à cet angle, E, de la table (fig. 77) une lampe, contre le bord opposé de la table un miroir, et je trace sur la table l'arc de cercle *ab*. Cette longue tringle *mn* est fixée au miroir porté par des rouleaux, et sert à le faire tourner autour de son axe vertical en même temps qu'elle sert d'index. J'ai tracé sur la table une raie noire avec laquelle l'index coïncide quand le miroir fait face

exactement à l'auditoire. Ceux qui sont vis-à-vis peuvent voir à la fois la tringle ou index et son image réfléchie dans la glace formant une seule et même ligne droite, ce qui prouve que la ligne

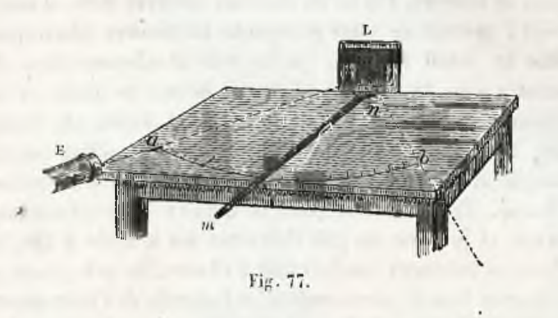


Fig. 77.

noire centrale est perpendiculaire au miroir. A droite et à gauche de cette ligne centrale l'arc est partagé en dix parties égales, commençant par zéro à l'extrémité a, et finissant par 20° à l'extrémité b. J'amène d'abord l'index dans la direction du faisceau émis par la lampe. Le faisceau tombe maintenant sur le miroir, le frappe perpendiculairement, et vous voyez qu'il est réfléchi dans la direction de la ligne d'incidence. J'amène maintenant l'index sur 1° ; le faisceau réfléchi, comme vous le voyez, se dessine sur la table, et coupe l'arc de cercle à la division 2. Je porte l'index sur 2°, le faisceau réfléchi vient à 4° ; je mets l'index sur 3°, le faisceau réfléchi est à 6° ; je place enfin l'index sur 10°, le faisceau réfléchi est à 20. Si, me tenant à égale distance entre les faisceaux incident et réfléchi, j'étends mes bras, les bouts de mes doigts touchent l'un et l'autre faisceau ; et je constate que l'un se trouve autant à la gauche de la perpendiculaire que l'autre à la droite. L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. Mais nous prouvons en même temps que le faisceau réfléchi fait deux fois autant de chemin que l'index ; ce que l'on exprime ordinairement en disant que la vitesse angulaire du rayon réfléchi est double de celle du miroir qui le réfléchit.

Je vous ai déjà fait voir que les pointes de charbon incandescent émettent une grande quantité de rayons obscurs, de rayons

de pure chaleur qui n'ont pas de pouvoir éclairant ; j'ai maintenant à vous montrer que dans la réflexion ces rayons de chaleur émis par la lampe ont obéi exactement aux mêmes lois que les rayons de lumière. J'ai ici un morceau de verre noir, si noir que quand à travers ce verre je regarde la lumière électrique, ou même le soleil à midi, je ne vois absolument rien. Vous constatez que le faisceau disparaît quand je place ce verre en avant de la lampe. J'intercepte tout rayon de lumière ; mais, si étrange que cela puisse paraître, ce même verre est transparent à un degré considérable pour les rayons obscurs de la lampe. J'éteins maintenant la lumière en interrompant le courant, et je place ma pile électrique sur la table à 20°, là où le faisceau lumineux tombait tout à l'heure. La pile est en communication avec le galvanomètre, et l'aiguille de l'instrument est maintenant à zéro. J'allume la lampe, aucune lumière n'apparaît, mais observez le galvanomètre ; l'aiguille s'est déjà élancée à 90° par l'action des rayons non lumineux sur la pile. Si je déplace la pile à droite ou à gauche de sa position actuelle, l'aiguille revient immédiatement à zéro ; les rayons calorifiques ont suivi exactement la trace des rayons lumineux ; et pour eux aussi, l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion. En répétant l'expérience que j'ai déjà exécutée avec la lumière, en portant l'index successivement sur 1, 2, 3, 5, etc., je prouverai que dans le cas aussi de la chaleur rayonnante, la vitesse angulaire du rayon réfléchi est double de celle du miroir.

La chaleur du feu obéit à la même loi. J'ai ici une feuille de fer-blanc, réflecteur vulgaire, mais qui répondra à mon dessein. A cette extrémité de la table je place ma pile thermo-électrique, et à l'autre extrémité mon réflecteur de fer-blanc. L'aiguille du galvanomètre est maintenant à zéro. Eh bien, je tourne mon réflecteur de manière que la chaleur tombant sur lui rebondisse sur la pile ; elle rencontre l'instrument, et l'aiguille annonce aussitôt son arrivée. Observez la position du feu, celle du réflecteur et celle de la pile ; vous voyez qu'ils sont exactement dans les positions qui font l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion.

Mais dans ces expériences la chaleur est ou a été associée

avec la lumière. Montrons maintenant que la loi subsiste pour des rayons émanant d'un corps véritablement obscur. Voici une boule de cuivre C (fig. 78), chauffée au rouge sombre ; je la plonge

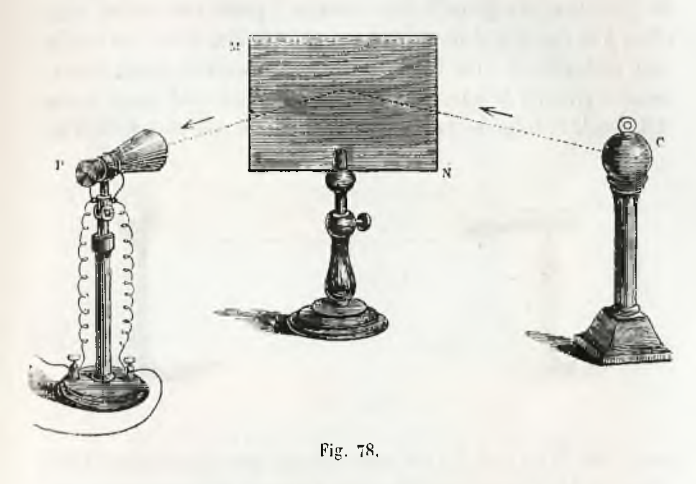


Fig. 78.

dans l'eau jusqu'à ce que sa lumière disparaisse totalement, mais en la laissant chaude. Elle donne encore de la chaleur rayonnante d'une intensité un peu plus grande que celle qui est émise par le corps humain. Je la place sur ce guéridon qui lui servira de support, et j'installe ici ma pile, P, en tournant son réflecteur conique, par rapport à la boule, de telle sorte qu'aucun des rayons *directs* émis par celle-ci ne puisse arriver à la pile. Vous voyez l'aiguille demeurer à zéro. Je place ici mon réflecteur de fer-blanc, M N, de manière qu'une ligne allant de la boule au réflecteur fasse avec la perpendiculaire à sa surface le même angle que la ligne allant du réflecteur à la pile. L'axe du réflecteur conique est dans cette dernière ligne. Fidèles à la loi, les rayons de chaleur émanés de la boule rebondissent et vont frapper la pile ; vous voyez le mouvement rapide de l'aiguille qui en est la conséquence.

Comme les rayons de lumière, les rayons de chaleur émanant

de notre boule marchent en ligne droite à travers l'espace, diminuant d'intensité exactement comme la lumière diminue. Ainsi, cette boule, qui lorsqu'elle est près de la pile fait fuir l'aiguille du galvanomètre jusqu'à 90°, montre à peine une action sensible, à la distance d'un mètre cinquante centimètres. Ses rayons sont dispersés de tous côtés, et un petit nombre comparativement arrivent à la pile. Mais j'introduis maintenant entre la pile et la boule ce tube de fer-blanc, A B (fig. 79), de trois mètres de

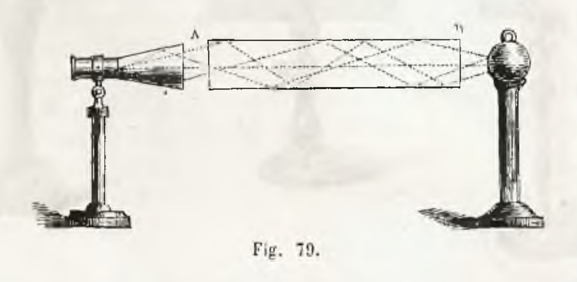


Fig. 79.

longueur. Il est poli à l'intérieur, et par conséquent capable de réflexion. Les rayons calorifiques qui frappent obliquement sa surface intérieure, sont réfléchis d'un côté à l'autre du tube, et par là les rayons qui, quand le tube n'y était pas, se perdaient dans l'espace, sont forcés, par cette série de réflexions intérieures, d'arriver à la pile. Vous voyez le résultat. L'aiguille, qui un moment auparavant ne manifestait pas de tendance sensible au mouvement, va rapidement butter contre ses arrêts.

Nous nous sommes arrêtés assez longtemps à la réflexion de la chaleur par des *surfaces planes*; considérons un instant la réflexion par des surfaces courbes. Voici un miroir concave, M N (fig. 80), en cuivre, mais plaqué d'argent. Je place cette boule chaude de cuivre, B, à une distance de cinquante centimètres de la pile, qui n'est plus armée de son réflecteur conique; c'est à peine si vous apercevez quelque mouvement de l'aiguille. Si je place le réflecteur, M N, à une distance convenable derrière une bougie, je rassemblerai les rayons, et les renverrai sous forme de faisceaux cylindriques de lumière. Je ferai la même chose

avec les rayons calorifiques émis par le boulet B ; vous ne pouvez pas, naturellement, voir la trace de ces rayons obscurs, comme vous voyez celle des rayons lumineux, mais vous constatez que pen-

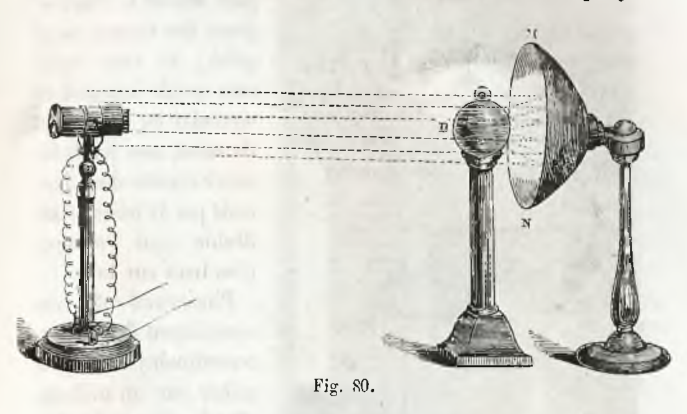


Fig. 80.

dant que je parle, le galvanomètre a révélé leur action ; l'aiguille de l'instrument est allée jusqu'à 90°.

J'ai ici une couple de miroirs beaucoup plus grands (fig. 81), dont l'un est mis à plat sur la table ; la courbure de ce miroir est réglée de telle sorte que si je place une lumière en ce point, qu'on appelle le foyer du miroir, les rayons qui tombent en divergeant sur le miroir sont réfléchis parallèlement au-dessus de lui. Faisons l'expérience : Je place au foyer les pointes de charbon ; je les amène au contact, puis je les sépare un peu ; la lumière électrique a jailli, et voici qu'un splendide faisceau cylindrique est projeté en haut par le réflecteur, et dessiné par l'action de la lumière sur la poussière de la salle. Si nous renversions l'expérience, et que nous fissions tomber un faisceau parallèle de lumière sur le miroir, les rayons de ce faisceau, après la réflexion, seraient réunis au foyer du miroir. Nous pouvons réaliser cette expérience en recourant à un second miroir ; le voilà attaché au plafond ; je le fais descendre à une hauteur de sept ou huit mètres au-dessus de la table ; le faisceau vertical, qui tombait auparavant sur le plafond, est maintenant reçu par le miroir supérieur


Fig. 81.

et j'ai suspendu à son foyer un morceau de papier huilé, qui rend plus visible la convergence des rayons en ce point, et vous voyez avec quelle intensité ce morceau de papier est illuminé, non par la lumière directe d'en bas, mais par la lumière réfléchie qui converge d'en haut sur lui.

Plusieurs d'entre vous connaissent l'action extraordinaire de la lumière sur un mélange d'hydrogène et de chlore. J'ai ici un ballon de collodion transparent rempli d'un mélange de ces deux gaz; j'abaisse mon réflecteur supérieur, et je suspends le ballon à un crochet qui y est fixé, de manière que le petit globe se balance à son foyer; je le hisse au plafond (fig. 81), et, comme tout à l'heure, je place mes pointes de charbon au foyer du miroir inférieur. Au moment où je les sépare, la lumière jaillit, les gaz font explosion. Et remarquez bien que cette

explosion est l'effet de la lumière. Vous savez que le collodion est une substance inflammable; vous pourriez donc croire que c'est la chaleur des pointes de charbon qui l'a enflammé, et qui a, à son tour, enflammé les gaz. Mais regardez! Pendant que je vous parle, les lambeaux du ballon tombent sur la table; les rayons lumineux l'ont traversé sans lui faire de mal; ils ont déterminé l'explosion des gaz, et l'acide chlorhydrique, formé par leur combinaison, a réellement empêché l'enveloppe inflammable de participer à la combustion.

J'abaisse le miroir supérieur et je suspends à son foyer un second ballon, contenant un mélange d'oxygène et d'hydrogène, sur lequel la lumière n'a pas d'action sensible; j'élève le miroir supérieur, et au foyer du miroir inférieur je place une boule de cuivre chauffée au rouge. Les rayons calorifiques sont maintenant réfléchis et convergent au foyer, comme les rayons lumineux étaient réfléchis et convergeaient dans la dernière expérience; mais ils agissent sur l'enveloppe, que j'ai un peu noircie à dessein pour la rendre capable d'intercepter les rayons de chaleur; l'action n'est pas aussi soudaine que dans le premier cas, mais *il y a encore* explosion, et vous ne voyez aucune trace du ballon; la substance inflammable est entièrement dissipée.

Vous pourriez objecter cette fois que la lumière est associée à la chaleur; très-bien, j'abaisse donc encore le miroir supérieur, et je suspends à son foyer une bouteille d'eau chaude. J'installe ma pile électrique au foyer du miroir inférieur; je tourne d'abord la face de la pile en haut, pour l'exposer au rayonnement direct de la bouteille chaude; il n'y a pas d'action sensible produite par les rayons directs. Mais je retourne ma pile, dont la face maintenant regarde en bas. Si la lumière et la chaleur se comportent de la même manière, les rayons sortis de la bouteille et qui frappent le réflecteur se réuniront à son foyer. Or, voyez que c'est ce qui a lieu; l'aiguille, qui n'était pas sensiblement affectée par les rayons directs, va butter contre son arrêt. Je vous prie de remarquer le sens de la déviation; l'extrémité rouge de l'aiguille se meut vers vous.

J'abaisse de nouveau le miroir, et à la place de la bouteille

d'eau chaude, j'en suspends une autre contenant un mélange réfrigérant. J'élève le miroir, et comme dans le premier cas, je place la pile au foyer du miroir inférieur. Quand sa face regarde la bouteille placée en haut, il n'y a pas d'action ; si elle regarde en bas, l'aiguille se meut : observez le sens du mouvement : l'extrémité rouge vient vers moi.

Ne dirait-on pas que le corps placé au foyer supérieur émet maintenant des rayons de froid qui sont rendus convergents par le miroir inférieur, exactement comme les rayons de chaleur dans notre première expérience ? Les faits sont exactement complémentaires, et il semble que nous soyons en droit de conclure de cette expérience l'existence et la convergence des rayons de froid, comme nous avons conclu des premières l'existence et la convergence des rayons de chaleur. Mais plusieurs d'entre vous auront sans doute déjà entrevu l'état réel des choses. La pile est un corps chaud, et dans la dernière expérience la chaleur qu'elle perdait par le rayonnement était plus que compensée par la chaleur qu'elle recevait de la bouteille chaude en haut. Maintenant c'est l'inverse, la chaleur que la pile rayonne est en excès sur la chaleur qu'elle reçoit, et voilà pourquoi elle se refroidit ; les échanges sont contre elle, sa perte de chaleur n'est que partiellement compensée, et la déviation est due au froid, qui en est la conséquence nécessaire.

APPENDICE A LA LEÇON VIII

SUR LES SONS PRODUITS PAR LA COMBUSTION DES GAZ DANS LES TUBES [1]

Dans le premier volume du journal de Nicholson, publié en 1802, il est parlé des sons produits par la combustion de l'hydrogène dans les tubes comme d'une expérience qui aurait été faite en Italie ; le docteur Higgins, dans le même journal, rappelle qu'il les a découverts en l'année 1777, en observant l'eau formée dans un vase de verre par la combustion lente d'un mince courant d'hydrogène. Chladni, dans son *Acoustique*, publiée en 1802, page 74, en parle comme ayant été mentionnés, et inexactement expliqués, par de Luc, dans ses *Nouvelles idées sur la Météorologie ;* je ne connais pas la date de ce volume. Chladni a montré que les sons produits étaient ceux d'un tuyau ouvert de même longueur que le tube qui enveloppait la flamme. Il réussit aussi à obtenir avec un même tube un son et son octave, et dans un cas il obtint la quinte à l'octave. Dans un mémoire publié dans le *Journal de Physique,* en 1802, G. de la Rive essaya d'expliquer ces sons en les attribuant à la contraction et à la dilatation alternatives de la vapeur aqueuse ; il appuyait son opinion d'expériences très-belles et très-ingénieuses faites avec des boules de thermomètre. En 1818, M. Faraday reprit le même sujet [2] et montra que les sons se produisaient lorsque le tube de verre était enveloppé d'une

[1] Extrait du *Philosophical Magazine* pour juillet 1857, par John Tyndall, F. R. S.

[2] *Journal of Science and the Arts*, vol. V, p. 274.

atmosphère dont la température était supérieure à 100 degrés. Il avait déjà conclu qu'ils n'étaient pas dus à la vapeur aqueuse, en montrant qu'ils étaient produits par la combustion de l'oxyde de carbone. Il les attribue enfin aux explosions successives produites par la combinaison périodique de l'oxygène de l'atmosphère avec le jet de gaz hydrogène.

Je ne sais si l'on a jamais signalé le fait que le ton du son rendu dépend du volume de la flamme. Mais je vais en premier lieu diriger brièvement votre attention sur ce point.

Je place un tube long de 60 centimètres sur le jet enflammé d'hydrogène; le son produit est la note fondamentale du tube.

Je remplace le tube de 60 centimètres par un de 30 centimètres, et il ne se produit aucun son.

Je diminue la flamme de manière à la rendre aussi petite que possible, et mets de nouveau sur la flamme le tube de 30 centimètres; il rend un son continu et musical, à l'octave de la note obtenue avec le tube de 60 centimètres.

Le tube de 60 centimètres mis à son tour sur la flamme diminuée ne donne plus sa note fondamentale, mais exactement la même note que le tube de la longueur moitié plus petite.

Nous voyons ainsi que, si la rapidité avec laquelle les explosions se succèdent dépend de la longueur du tube, la flamme a aussi sa voix dans la question; que pour produire un son musical, son volume doit être tel qu'elle puisse faire explosion à l'unisson des ondulations du ton fondamental du tube, ou de l'un de ses harmoniques.

Avec un tube long de 15 à 20 centimètres, en faisant varier le volume de la flamme, et en réglant la profondeur à laquelle elle pénètre dans l'intérieur du tube, j'ai obtenu une série de notes représentées par les nombres 1, 2, 3, 4, 5.

Ces expériences donnent raison de la nature capricieuse des sons obtenus quelquefois par des physiciens dans des leçons publiques; elles prouvent qu'on peut toujours rendre les sons produits nets et continus en proportionnant le volume de la flamme à la longueur du tube[1].

Depuis les expériences de M. Faraday, rien que je sache n'avait été ajouté à ce sujet, jusqu'à ces derniers temps; lorsque dans un numéro

[1] Avec un tube de 30 centimètres et un jet de gaz extrêmement petit, j'ai obtenu, sans augmenter la quantité de gaz émise, une note et son octave; la flamme avait, dans ce cas, la faculté de changer ses propres dimensions pour s'accommoder aux deux notes successivement émises.

très-récent des *Annales de Poggendorff*, M. von Schaffgotsch décrivit une expérience intéressante et qui fut de la part de M. Poggendorff lui-même, le sujet de quelques remarques. On obtenait un son musical avec un jet de gaz d'éclairage ordinaire ; et l'on constatait que lorsqu'on rendait le même son avec la voix, la flamme s'animait d'un mouvement très-vif et dont l'intensité pouvait croître assez pour que la flamme s'éteignît. M. von Schaffgotsch n'avait pas décrit les conditions nécessaires au succès de son expérience, et c'est en m'efforçant de les trouver que j'ai découvert les faits objets de cette courte note. Je ferai remarquer avant tout que les résultats de M. von Schaffgotsch peuvent être obtenus avec certitude pourvu que l'on fasse sortir le gaz sous pression suffisante, à travers un petit orifice.

Dans mes premières expériences, je me suis servi d'un bec de cuivre effilé, long de 40 centimètres, avec un orifice supérieur d'environ 12 millimètres de diamètre. Le tremblement de la flamme chantante, lorsque la voix atteignait exactement le ton voulu, était si manifeste qu'il pouvait être vu par plusieurs centaines de personnes à la fois.

Je plaçais une syrène à quelques décimètres de la flamme chantante, et je lui faisais rendre un son de plus en plus élevé ; à mesure que les sons de la flamme et de la syrène approchaient de l'unisson parfait, la flamme s'agitait, montait et descendait vivement dans le tube. Plus tard, l'intervalle entre deux sauts successifs augmentait jusqu'à ce que l'on fut arrivé à l'unisson parfait ; les mouvements alors cessaient pour un instant, mais pour reparaître quand le ton du son rendu par la syrène dépassait l'unisson, et devenir de plus en plus rapides jusqu'à ce que l'œil ne pût plus les discerner.

Cette expérience prouve que l'agitation de la flamme, observée par M. von Schaffgotsch est l'expression optique des battements qui se produisent de part et d'autre de l'unisson. Si l'on s'arrange de manière à entendre les battements, on constate qu'ils sont en parfait accord avec le raccourcissement et l'allongement de la flamme. En dehors de l'intervalle auquel correspondent les battements, avant et après l'unisson, le son de la syrène n'imprime pas à la flamme de mouvement visible. Ce qui est vrai de la syrène est vrai de la voix.

Pendant que je répétais et que je variais ces expériences, il arriva qu'une flamme était restée silencieuse au sein du tube, et qu'en élevant la voix jusqu'à rendre la note du tube, la flamme, à ma grande surprise, se mit subitement à chanter. En appuyant le doigt à l'extrémité du tube, je fis taire la flamme ; je répétai l'expérience, et le résultat obtenu fut toujours le même.

Je plaçai la syrène près de la flamme, comme auparavant. Celle-ci brûlait tranquillement dans son tube. Partant du ton le plus bas, je fis rendre à la syrène un son de plus en plus élevé; au moment où la syrène sonna à l'unisson du son propre au tube qui enveloppait la flamme, celle-ci s'élargit subitement et commença son chant, qu'elle continua indéfiniment, même après que la syrène eut cessé de résonner.

Avec le tube que j'ai décrit, et un tube de verre de 30 centimètres de longueur, de 12 à 18 millimètres de diamètre intérieur, ce résultat peut être obtenu avec facilité et certitude. Si le son rendu par la voix est un peu plus haut ou un peu plus bas que le son propre du tube, il ne produit aucun effet visible sur la flamme; le ton de la voix doit nécessairement se trouver dans la région des battements perceptibles.

Si l'on fait varier la longueur du tube, le son qu'il rend varie, et la voix doit être modifiée en conséquence.

Que les tremblements de la flamme, auxquels j'ai déjà fait allusion, soient en concordance exacte avec les battements, c'est ce qu'on démontre d'une très-belle manière en se servant d'un diapason, qui donne la même note que la flamme. En chargeant le diapason d'un petit poids, pour l'écarter un peu de l'unisson avec la flamme, le faisant vibrer et l'approchant de la flamme, on voit les bonds survenir exactement aux intervalles auxquels on entend les battements. Lorsque le diapason est placé sur une boite ou sur un vase renforçants, les battements peuvent être entendus et les bonds peuvent être vus par un millier de personnes à la fois Quand on change la charge du diapason, ou qu'on modifie légèrement le volume de la flamme, la rapidité avec laquelle les battements se succèdent, change, mais dans tous les cas les bonds frappent les yeux aux moments précis où les battements frappent les oreilles.

J'ai obtenu avec le diapason les mêmes résultats qu'avec la voix et la syrène. En tenant un diapason au-dessus d'un tube rendant le même son que lui et recouvrant une flamme de gaz silencieuse, on détermine la flamme à chanter spontanément. J'ai très-bien réussi avec des tubes dont la longueur variait entre 25 et 75 centimètres. On peut faire aussi l'expérience suivante : — On prend une série de tubes rendant chacun un des sons de la gamme; on les installe sur autant de jets de gaz convenablement réglés, et silencieux; on fait exécuter la gamme par un musicien avec un instrument suffisamment puissant, placé à la distance de vingt à trente mètres, et l'on constate qu'à chaque note

que l'on fait entendre le jet de gaz contenu dans le tube correspondant se met immédiatement à chanter.

Je dois faire remarquer, néanmoins, qu'avec le jet dont je me suis servi, l'expérience réussit beaucoup plus facilement lorsque le tube a de 27 à 30 centimètres de longueur : avec des tubes plus longs il est plus difficile d'empêcher la flamme de chanter spontanément, c'est-à-dire sans excitation extérieure.

Le point principal à observer est celui-ci : avec un tube de 30 centimètres, par exemple, de longueur, il faut, pour qu'elle puisse chanter avec son maximum d'intensité, que la flamme occupe une certaine position dans le tube. Élevons le tube de manière que la flamme y pénètre sur une longueur moindre, la force du son sera par cela même notablement diminuée, et l'on atteindra bientôt à un point (A), où il cessera tout à fait.

A partir de ce point, et sur une certaine distance au delà, on pourra faire brûler la flamme tranquillement et en silence aussi longtemps qu'on voudra, mais dès qu'elle sera excitée par la voix elle chantera.

Si la flamme est trop près du point (A), et qu'on l'excite par la voix ou par un diapason, elle répondra, mais pour un temps très-court, pour se taire presque aussitôt. Un peu au delà du point où le silence se rétablit, la flamme brûle sans bruit, si elle n'est pas excitée, mais si une fois on la fait chanter, elle continuera indéfiniment. Avec une flamme semblable, qui n'est pas trop sensible aux impressions extérieures, j'ai pu produire l'effet inverse de celui décrit jusqu'ici, et éduire à volonté la flamme au silence, sans qu'elle s'éteigne, par le son de ma voix ou d'un diapason. J'ai trouvé que dans ces conditions la flamme obéissait au commandement, qu'elle chantait ou se taisait, à la volonté de l'expérimentateur.

Le simple claquement des mains, la production d'une explosion, un cri faux, l'ébranlement du tube qui environne la flamme, sont inefficaces à la faire partir quand les dispositions n'ont pas été prises convenablement. Chacun de ces troubles affecte sans doute la flamme, mais les pulsations produites ne s'ajoutent pas, comme dans le cas où l'on attaque la note même que le tube peut rendre. Il semble que la flamme soit sourde à une impulsion unique, comme le serait probablement le tympan, et que, pour le tympan comme pour la flamme, il faut des successions d'impulsions pour arriver à déterminer un mouvement persistant. Une différence d'un demi-ton entre deux diapasons suffit pour que l'un d'eux fasse chanter la flamme, tandis que l'autre est impuissant à produire cet effet.

J'ai dit que la voix devait émettre le son du tube qui entoure la flamme ; il serait plus correct de dire la note produite par la flamme quand elle chante. Car, dans tous les cas cette note est sensiblement plus élevée que la note propre du tube qui entoure la flamme; cela doit être, à cause de la haute température de l'air dans la colonne en vibration. Un tube ouvert, par exemple, qui, lorsqu'un diapason est placé devant son extrémité, produit le maximum du renforcement, rend, lorsqu'il enveloppe la flamme, une note plus élevée que celle du diapason. Pour obtenir cette dernière note il faudrait un tube sensiblement plus long.

Quelle est la constitution de la flamme pendant qu'elle produit ces sons musicaux ? C'est la question sur laquelle je vais maintenant appeler votre attention. Vue à l'œil nu, la flamme sonore parait continue ; mais l'est-elle réellement ? En supposant que chaque impulsion soit accompagnée d'un changement physique de la flamme, ce changement ne serait pas perceptible à l'œil nu, en raison de la rapidité avec laquelle les impulsions se succèdent l'une à l'autre. La lumière de la flamme doit paraître continue, d'après le même principe que la partie trouble d'un jet liquide descendant paraît continue, quoique, par des moyens convenables, on puisse montrer que cette portion du jet est composée de gouttes isolées. Si nous faisons passer rapidement l'image de la flamme sur différentes parties de la rétine, les changements qui accompagnent les impulsions périodiques se manifestent d'eux-mêmes dans les caractères distinctifs de l'image ainsi tracée.

J'ai pris un tube de 95 centimètres de longueur et d'environ 30 millimètres de diamètre, et, en le plaçant sur une très-petite flamme de gaz oléfiant (on pourrait le remplacer par du gaz ordinaire), j'ai obtenu la note fondamentale du tube ! Quand on remuait la tête à droite et à gauche l'image de la flamme sonore se séparait en une série d'images distinctes ; la distance entre les images dépendait de la vitesse avec laquelle je remuais la tête. Cette expérience se fait beaucoup mieux dans un amphithéâtre obscur. On obtenait encore plus facilement, de cette manière, la séparation des images, lorsqu'on se servait d'un tube de deux mètres de longueur, et d'une flamme plus grande.

On obtient le même résultat en faisant mouvoir à droite et à gauche devant les yeux une lorgnette de spectacle.

Mais la manière la plus convenable d'observer la flamme, est de se servir d'un miroir et de la regarder soit directement dans le miroir, soit en projection sur un écran.

On dresse une lentille de 33 centimètres de foyer en avant d'une flamme de gaz ordinaire longue de plus de 2 centimètres et demi, et l'on suspend un écran de papier à 2 ou 3 mètres derrière la flamme. On reçoit sur un petit miroir tenu à la main la lumière qui a traversé la lentille, et on la réfléchit sur l'écran placé en arrière. En éloignant ou rapprochant la lentille, on obtient sur l'écran une image renversée, mais bien nette de la flamme. En agitant le miroir on déplace l'image, et, par suite de la persistance des impressions sur la rétine, dès que le mouvement est suffisamment rapide l'image décrit une courbe lumineuse continue. En tenant le miroir immobile, on plaçait sur la flamme le tube de deux mètres; et l'on voyait celle-ci changer de forme à l'instant où elle commençait à résonner, sans cesser toutefois de produire sur l'écran une image bien définie. Mais quand on agitait le miroir, il se produisait un effet tout différent; au lieu d'une trace continue de lumière, on remarquait une série d'images distinctes de la flamme sonore. La distance qui séparait les images variait avec le mouvement du miroir; et en le faisant tourner convenablement on parvenait à obtenir un cercle entier d'images. L'expérience est très-belle, et dans une salle obscure on peut la rendre visible à un nombreux auditoire.

On a encore varié l'expérience de la manière suivante : Un prisme en bois triangulaire ayant ses faces latérales revêtues de morceaux de miroirs rectangulaires en verre, était suspendu à un fil, avec son axe vertical; on imprimait une torsion au fil, et le prisme, sollicité par cette torsion, tournait autour de son axe. Il était installé de telle sorte que ses trois faces reçussent successivement le faisceau de lumière envoyé par la flamme à travers la lentille placée devant elle, et projetait les images sur l'écran. Quand le mouvement commençait, les images n'étaient que légèrement séparées, mais elles le devenaient de plus en plus à mesure que le mouvement approchait de son maximum. Le maximum atteint, les images se serraient encore plus, au point de former un cercle de perles lumineuses. Si on laisse réagir la torsion exercée, on retrouve la même série d'effets produits par la rotation en sens contraire. Dans ces expériences, la moitié du tube tournée du côté de l'écran doit être revêtue de noir de fumée, pour empêcher la lumière directe de tomber sur l'écran[1].

[1] Depuis que ces expériences ont été faites, M. Wheatstone a attiré mon attention sur le passage suivant, qui prouve qu'il avait fait usage avant moi du miroir tournant pour examiner une flamme chantante : « Une flamme

Mais quel est l'état de la flamme dans l'intervalle entre deux images? La flamme de gaz ordinaire, ou de gaz oléfiant, doit sa clarté aux particules de carbone qui y sont déposées. Si l'on souffle sur un bec de gaz enflammé, on entend un son ou mieux une petite explosion, et le souffle peut éteindre la lumière. Dans les nuits de vent, les jets de gaz des devantures des boutiques sont souvent privées de leur lumière, et brûlent bleu. De même, le souffle d'un chalumeau ordinaire enlève presque tout son éclat à la flamme du gaz de la houille. J'avais conclu de là que les explosions, dont la répétition produit le son musical, rendaient, au moment où elles se produisent, la combustion si parfaite que les particules solides de carbone cessaient de devenir incandescentes, et je pensai qu'en examinant de plus près les images sur l'écran, on les verrait séparées par des espaces bleus que leur défaut d'éclat empêchait de voir par projection; c'est en effet ce qui est arrivé dans quelques cas.

Rien cependant ne m'avait préparé au spectacle dont j'ai été témoin. Je m'étais procuré une flamme de gaz oléfiant aussi petite que possible; je plaçai sur elle le tube de 95 centimètres; la flamme, en chantant, s'allongea, et perdit quelque chose de sa lumière, elle restait toutefois brillante à son sommet; en la regardant dans le miroir tournant, je la vis sous forme de chapelet d'une grande beauté; en avant de chaque grain brillait une petite étoile lumineuse; après l'étoile et lui succédant sans discontinuité, une tache de lumière d'un bleu riche, laissait, autant que je pus en juger, un espace parfaitement obscur entre elle et l'étoile lumineuse suivante. J'examinerai ceci plus amplement quand le temps me le permettra, mais autant que je puis en juger maintenant, la flamme s'éteignait et se rallumait réellement en accord avec les pulsations sonores.

Lorsqu'une flamme silencieuse, capable, néanmoins, d'être excitée par la voix de la manière déjà décrite, est placée dans l'intérieur d'un tube, et que l'on regarde la ligne continue de lumière produite par elle dans le miroir mobile, je ne connais pas d'expérience plus jolie que la résolution de cette ligne en un cordon de perles très-lumineuses à l'instant où la voix atteint la note convenable. Cet effet peut être

de gaz hydrogène, brûlant à l'air libre, présente un cercle continu sur le miroir; mais, pendant qu'elle produit un son dans l'intérieur d'un tube de verre, on remarque des intermittences régulières d'intensité qui présentent l'apparence d'une chaîne, et indiquent des contractions et des dilatations alternatives de la flamme correspondant aux vibrations sonores de la colonne d'air. » (*Phil. Trans.*, 1834, p. 586.)

obtenu d'une distance considérable du jet, et le dos tourné contre lui.

Le changement produit dans la ligne des grains lorsqu'on pose sur le tube ou sur un vase résonnant placé près du tube un diapason capable de donner des battements avec le son de la flamme, est aussi extrêmement intéressant à observer. Je ne veux pas entrer maintenant dans une description plus détaillée de ces faits. Je crois en avoir dit assez pour engager les expérimentateurs à reproduire pour eux-mêmes ces curieux phénomènes ; ils auront plus de plaisir à les voir qu'à lire toutes les descriptions que je pourrais en faire.

TRADUCTION D'UN MÉMOIRE SUR DES EXPÉRIENCES D'ACOUSTIQUE [1]

Un tube de verre ouvert aux deux bouts, lorsqu'on souffle simplement dessus avec la bouche, donne sa note fondamentale, c'est-à-dire le son le plus bas qu'il peut rendre, comme un tuyau d'orgue, faiblement mais distinctement. En plaçant la main ouverte sur l'une des ouvertures et en la retirant rapidement, le tube rend deux notes, l'une après l'autre ; premièrement la note fondamentale du tuyau fermé, puis la note du tuyau ouvert déjà mentionnée, *plus haute d'un octave*. On sait que par l'application de la chaleur, on obtient ces deux notes fondamentales, dont la plus haute sera seule prise ici en considération. On l'obtient immédiatement en soufflant extérieurement sur un tube chauffé, ou en faisant brûler une flamme de gaz dans son intérieur. Par exemple, un tube de 242 millimètres de longueur et de 20 millimètres de diamètre, échauffé sur toute sa longueur, donne un son plus élevé d'une tierce majeure, ou *sol*^{5} au lieu du *mi*^{5} qu'il rend naturellement. Si une flamme de gaz, longue de 14 millimètres et large à sa base de 1 millimètre, brûle dans le tube, le son s'élève à *fa*^{4}. La même flamme de gaz fait rendre à un tube de de 275 millimètres de longueur et de 21 millimètres de largeur, au lieu de son son propre le *ré*^{5}. Ces deux tubes, que, pour abréger, j'appellerai désormais le tube *mi* et le tube *ré*, ont servi pour toutes les expériences suivantes, dont l'objet est de montrer un fait bien

[1] Par le comte Schaffgotsch, *Phil. Mag.*, décembre 1857.

connu mais qui n'en est pas moins très-surprenant et très-frappant, à savoir que la colonne d'air est mise en vibration lorsqu'on fait entendre en dehors du tube son son fondamental ou l'un de ses harmoniques, par exemple, l'octave. J'ai réussi à mettre en évidence l'existence de ces vibrations aériennes par une colonne de fumée, un courant de gaz et une flamme de gaz.

1. J'ai placé immédiatement au-dessous du tube *mi* dressé verticalement, une bougie allumée mais fumeuse, de telle sorte que la fumée traversât le tube, sous la forme d'un jet rectiligne et continu. A une distance de 1,5 mètre du tube, on fit résonner le son mi^3, la fumée se boucla ; on aurait dit qu'elle était repoussée d'un côté vers l'orifice supérieur, de l'autre côté vers l'orifice inférieur du tube.

2. Deux becs de gaz, d'un millimètre d'ouverture, furent installés l'un près de l'autre, sur un même tube adducteur. Du gaz ordinaire s'échappait de tous les deux ; un des jets pénétrait dans l'intérieur du tube *ré* jusqu'au cinquième environ de sa longueur ; l'autre flamme avait 3 millimètres de hauteur. A une distance de 1,5 mètre on fit résonner $ré^3$. Cette seconde flamme grandit pendant quelque temps en longueur et en largeur, et par conséquent en volume total ; une plus grande quantité de gaz sortit donc du bec extérieur, ce qui ne pouvait être expliqué que par une diminution du courant dans le bec intérieur, c'est-à-dire de celui qui était entouré par le tube de verre.

3. Un bec, d'une ouverture de 1 millimètre, pénétrant de bas en haut dans le tube *ré*, d'environ 80 millimètres, donnait une flamme de 14 millimètres de longueur. A 5,6 mètres de là on fit résonner mi^3; la flamme s'éteignit instantanément. La même chose avait lieu à 7 mètres, lorsque la flamme avait seulement 10 millimètres de hauteur, quand on produisait le $ré^3$.

4. La dernière flamme dont il vient d'être parlé s'éteignait encore quand la note *sol* résonnait près d'elle. Du bruit, comme celui qui se fait en battant des mains, en poussant une chaise, en fermant un livre ne produisait pas cet effet.

5. Un bec de 0,5 millimètre d'ouverture, pénétrant de bas en haut sur une longueur de 60 millimètres dans le tube *ré*, donne une flamme globulaire de gaz de 3 à 3,5 millimètres de diamètre. En fermant graduellement un robinet on limitait de plus en plus la quantité de gaz. La flamme alors devenue subitement bien plus longue, mais en même temps plus étroite, et presque cylindrique, prenait une couleur bleuâtre, et l'on entendait sortir une note perçante qui était le *ré* ; c'est le phénomène appelé harmonica chimique, et connu depuis

quatre-vingts ans. Lorsque le robinet est encore plus fermé, le son devient plus fort, la flamme devient plus longue, plus étroite, et taillée presque en pointe de fuseau; à la fin elle disparaît.

Un effet exactement semblable à celui qu'on obtient en arrêtant le gaz est produit sur la flamme quand l'un des sons *ré*^{2} ou *ré*^{3} est rendu par la voix ou par des instruments; et dans ce cas on remarque que la flamme est en général d'autant plus sensible qu'elle est plus petite, et que le bec pénètre davantage dans le tube de verre.

6. La flamme dans le tube *ré* avait 2 ou 3 millimètres de longueur, et à une distance de 16,3 mètres d'elle, on faisait sonner le son *ré*^{3}. La flamme acquérait immédiatement la forme anormale, et l'on entendait le son *ré*^{4} surgir et continuer de se produire au sein du tube.

7. Tandis que le son *ré* de l'expérience précédente continuait à retentir, on fit résonner fortement, tout près du tube, le son *ré*^{3}, aussitôt la flamme devint excessivement allongée, et disparut.

8. La flamme ayant seulement 1,5 millimètre de longueur, on fit résonner le son *ré*^{3}. La flamme donna le son *ré*^{4} (peut-être même quelquefois un *ré* plus élevé) mais pour un moment seulement, et disparut. La flamme est aussi influencée par les différents *rés* dièzes d'un sifflet, à embouchure ajustable, par les trois *rés*, *ré*^{2}, *ré*^{3} et *ré*^{4}, d'un harmonium, mais non par l'*ut* ou le *ré* aigus de ce puissant instrument. Elle est aussi influencée par le *ré*^{3} d'une clarinette, mais seulement lorsqu'elle en est tout à fait près. La note chantée agit aussi lorsqu'elle est produite par aspiration (il faut que ce soit un *ré*), ou lorsque la bouche est détournée de la flamme.

9. Dans le voisinage immédiat, la note *sol* chantée est encore efficace.

Les bruits, mais non pas tous, exercent aussi une certaine influence; les plus efficaces ne sont pas toujours les plus forts ou les plus proches, sans doute parce que le son excitateur n'y est pas contenu.

10. Une flamme brûlant tranquillement dans l'intérieur du tube *ré* avait environ 2,5 millimètres de longueur. Dans la chambre voisine, dont la porte était ouverte, on frappa simultanément avec les quatre pieds d'une chaise sur le parquet de bois. Le phénomène de l'harmonica chimique se produisit immédiatement. Au bruit d'une chaise une très-petite flamme s'éteint ordinairement, après avoir résonné un instant. Un tambourin, lorsqu'on le frappe, agit quelquefois, mais non pas en général.

11. Une flamme brûlait dans la condition où elle chante par excitation au sein du tube *ré*, on éleva lentement le tube aussi haut que possible sans faire revenir la flamme à la condition ordinaire. A une distance de 1,5 mètre on fit résonner fortement, mais pour l'interrompre subitement, le son *ré* ^{3}; le son harmonique cessa, et la flamme tomba dans un état de repos sans s'éteindre.

12. On obtenait le même résultat en influençant le tirage d'air dans le tube par le mouvement en éventail de la main ouverte et tenue tout près de l'ouverture supérieure du tube.

13. Dans le tube *ré* on avait placé deux becs tout près l'un de l'autre; l'un d'eux, de 0,5 millimètre de diamètre, débouchait à 5 millimètres au-dessus de l'autre, dont l'orifice avait au plus 1 millimètre. Des courants de gaz, indépendants l'un de l'autre, sortaient de tous les deux; celui qui sortait du bec plus étroit très-faible, et brûlant lorsqu'il était allumé avec une flamme d'environ 1,5 millimètre de longueur, était presque invisible de jour. On rendit en chantant, à une distance de 5 mètres le son *ré*. Aussitôt le fort courant de gaz s'enflamma, parce que la petite flamme située au-dessous de lui s'allongea, et pénétra jusque dans son intérieur. En faisant retentir le son avec plus de force, on éteignit la petite flamme, de sorte qu'il y eut en réalité transport de flamme d'un bec à un autre. Bientôt après le faible courant de gaz s'allume à la manière ordinaire par le contact de la grande flamme, et si l'on éteint celle-ci seule, tout est prêt pour une répétition de l'expérience.

14. On obtient le même résultat en frappant avec la chaise, etc. Il est évident que de cette manière des flammes de gaz d'un volume quelconque et toutes les transmissions mécaniques peuvent être produites par des sons musicaux et des bruits, à la condition de tendre à travers ce tube de verre par un poids, un fil que la flamme de gaz devra atteindre.

16. Si regardant fixement la flamme de l'harmonica chimique, on remue rapidement la tête à droite et à gauche alternativement, on voit non plus une traînée de lumière continue, telle qu'elle est donnée par les autres corps lumineux, mais une série de flammes très-rapprochées, et souvent des figures dentelées et ondulées, surtout quand on emploie des tubes d'un mètre et des flammes d'un centimètre de longueur.

Cette expérience réussit aussi très-bien, et sans qu'il faille remuer les yeux, quand on regarde la flamme à travers une lorgnette de spectacle, dont on déplace vivement l'objectif à droite et à gauche, ou

circulairement; et aussi quand on regarde l'image de la flamme dans un miroir tenu à la main et que l'on fait tourner. Ce n'est là, néanmoins, qu'une variation de l'expérience depuis longtemps décrite et expliquée par M. Wheatstone, qui employait un miroir mis en rotation par un mouvement d'horlogerie.

[Il est peut-être juste que j'appelle l'attention sur les rapports qu'a le mémoire qui précède avec un autre que j'ai publié sur le même sujet. Le 6 mai, et les jours immédiatement suivants, les faits principaux décrits dans mon mémoire étaient découverts; mais le 30 avril, M. le professeur Poggendorff communiquait à l'Académie des sciences de Berlin les expériences que nous venons de rappeler. Par la bienveillance de M. Schaffgotsch lui-même, je reçus son mémoire à Chamounix plusieurs semaines après la publication du mien, mais jusqu'alors je n'avais pas su qu'il eût continué ses expériences sur ce sujet.

Nous avons ainsi travaillé indépendamment l'un de l'autre, mais si les phénomènes sont communs à tous deux, tout le mérite de la priorité reste au comte Schaffgotsch. — J. T.]

LEÇON IX

(20 MARS, 1862)

Loi de la diminution avec la distance. — Les ondes du son sont longitudinales; celles de la lumière, transversales. — Lorsqu'elles oscillent, les molécules des différents corps communiquent différentes quantités de mouvement à l'éther.—Le rayonnement est la communication du mouvement à l'éther. — L'absorption est l'accaparement du mouvement par l'éther. — Les surfaces qui rayonnent bien absorbent bien. — Une couverture de laine très-serrée facilite le refroidissement. — Influence préservatrice d'une feuille d'or. — Les atomes des corps choisissent certaines ondes pour les détruire, et laissent passer les autres. — Transparence et diathermancie. — Les corps diathermanes rayonnent mal. — Le terme *qualité* appliqué à la chaleur rayonnante. — Les rayons qui passent sans absorption n'échauffent pas le milieu; les rayons solaires les plus puissants passent à travers l'air, tandis que l'air demeure au-dessous de la température de la congélation. — Proportion des rayons lumineux et des rayons obscurs dans différentes flammes.

J'ai dit que l'intensité de la chaleur rayonnante diminuait avec la distance de la même manière que l'intensité de la lumière. Quelle est pour la lumière la loi de la diminution? J'ai ici une feuille carrée de papier, chaque côté du carré mesurant deux pieds; je le plie de façon à former un carré plus petit, dont chaque côté ait un pied de long. La lampe électrique est maintenant à une distance de seize pieds de l'écran; à une distance de huit pieds, c'est-à-dire exactement au milieu de la distance entre l'écran et la lampe, je tiens ce carré de papier; la lampe est vue sortie de sa chambre, et les rayons soustraits à l'influence des lentilles sont émis dans tous les sens. Vous voyez l'ombre du carré de papier sur l'écran. Mon préparateur a me-

suré la limite de cette ombre. Maintenant je déplie ma feuille de papier de manière à reproduire le grand carré primitif, vous voyez par les plis qu'il a quatre fois exactement la surface du petit carré. J'étends cette grande feuille sur l'écran, et je trouve qu'elle couvre exactement l'espace occupé d'abord par l'ombre du petit carré.

Sur le petit carré, lorsqu'il est au milieu de la distance entre la lampe et l'écran, il tombe donc une quantité de lumière qui occupe sur l'écran, quand le petit carré est enlevé, une superficie quatre fois plus grande. Mais si la même quantité de lumière est disséminée sur une surface quatre fois plus grande, elle doit être diluée et réduite au quart de son intensité primitive. Donc, en doublant la distance à la source de lumière, nous réduisons son intensité au quart. Par une expérience exactement semblable, nous prouverions qu'en triplant la distance nous réduisons l'intensité à un neuvième; qu'en quadruplant la distance, nous réduisons l'intensité à un seizième ; en un mot, nous démontrons ainsi la loi que l'intensité de la lumière diminue comme le carré de la distance augmente. C'est, appliquée à la lumière, la célèbre loi de la diminution en raison inverse du carré de la distance.

Mais j'ai dit que la chaleur diminuait suivant la même loi. Remarquez l'expérience que je vais maintenant faire devant vous. J'ai ici un vase de fer-blanc, assez plat, mais présentant une face d'un mètre carré de superficie, M N (fig. 82). Vous voyez que j'ai recouvert cette face de noir de fumée. Je remplis le vase d'eau chaude, dans le dessein de faire de cette large surface une source de chaleur. Je place maintenant le réflecteur conique sur la pile thermo-électrique, P ; mais au lieu de lui permettre de rester réflecteur, j'introduis dans le cône creux cette doublure de papier noir qui le recouvre exactement, et qui, au lieu de réfléchir la chaleur qui aurait pu tomber obliquement, empêche complétement toute radiation oblique. La pile est mise maintenant en communication avec le galvanomètre, et je place son réflecteur tout près de cette large surface rayonnante, la face de la pile étant à environ seize centimètres de la surface.

L'aiguille du galvanomètre se meut : laissons-la se mouvoir

jusqu'à ce qu'elle prenne sa position finale. La voici arrêtée à 60°, et elle y restera aussi longtemps que la surface rayonnante demeurera sensiblement constante. Je vais maintenant éloigner

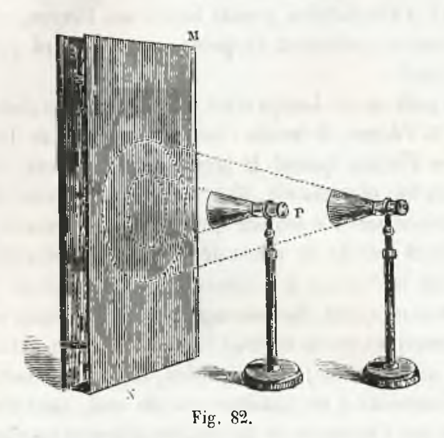


Fig. 82.

graduellement la pile de la surface, et je vous demanderai d'observer l'effet produit sur le galvanomètre. Vous vous attendez naturellement à voir, quand j'éloignerai la pile de la source de chaleur, l'intensité de la chaleur diminuer et la déviation du galvanomètre s'amoindrir dans un degré proportionnel. Me voici à une distance double, et l'aiguille n'a pas bougé ; je triple la distance, et l'aiguille reste stationnaire ; je quadruple, je quintuple, je décuple la distance, et l'aiguille s'obstine à ne pas se séparer de la déviation de 60°. Il n'y a, selon toute apparence, aucune diminution d'intensité à mesure que la distance augmente.

De cette expérience, qui semble à première vue tout à fait fatale à la loi de la diminution en raison inverse du carré de la distance, en tant qu'appliquée à la chaleur, Melloni a tiré de la manière la plus ingénieuse la démonstration rigoureuse de cette même loi. Suivez bien son raisonnement. Je place de nouveau la pile tout près de la surface rayonnante. Imaginez que le cône creux qui regarde la pile soit prolongé, il coupera la surface

rayonnante suivant un cercle, et ce cercle est la seule partie de la surface dont les rayons puissent arriver à la pile. Tous les autres rayons sont arrêtés par le revêtement non réfléchissant du cône. Je porte le cône à une distance double; la section du cône prolongé circonscrit maintenant sur la surface rayonnante un cercle quadruple du premier cercle; à une distance triple, l'aire circonscrite par la surface rayonnante est neuf fois plus grande; elle est cent fois plus grande à une distance décuple. Or, la constance de la déviation prouve invinciblement que l'augmentation de la surface rayonnante est exactement compensée par la diminution d'intensité. Et puisque la surface rayonnante croît comme le carré de la distance, il faut absolument que l'intensité de la chaleur diminue proportionnellement au carré de la distance; l'expérience qui semblait à première vue fatale à la loi, la démontre donc de la manière la plus simple et la plus concluante.

Revenons pour un moment à nos idées fondamentales sur la chaleur rayonnante. Son origine est un mouvement oscillatoire des dernières particules de la matière, mouvement dont l'éther s'empare, et qu'il propage par ses propres ondes. Mais les particules de l'éther dans ces ondes n'oscillent pas de la même manière que les particules de l'air dans le cas du son. Les particules de l'air se meuvent en avant et en arrière, dans le sens suivant lequel le son se propage; les particules de l'éther se meuvent à droite et à gauche, perpendiculairement à la ligne suivant laquelle la lumière se propage. Les ondulations de l'air sont longitudinales, les ondulations de l'éther sont transversales. Les ondes de l'éther ressemblent plus aux rides de l'eau qu'aux impulsions aériennes qui produisent le son; c'est ce qui a été déduit de l'ensemble des phénomènes optiques. Mais il est évident que l'ébranlement produit dans l'éther doit dépendre du caractère de la masse oscillante; un atome peut être plus difficile à mouvoir qu'un autre atome, et il ne faut pas s'attendre à ce qu'un atome unique produise un ébranlement aussi grand qu'un groupe d'atomes oscillant d'ensemble. Ainsi, lorsque différents corps sont chauffés, nous devons *a priori* nous attendre à voir

qu'ils ne détermineront pas tous la même quantité d'ébranlement dans l'éther. Il est probable que quelques-uns communiqueront une plus grande quantité de mouvement que d'autres; en d'autres termes, que quelques-uns rayonneront plus abondamment que d'autres; car le rayonnement, rigoureusement défini, *est la communication du mouvement des particules d'un corps chauffé à l'éther dans lequel ces particules sont plongées.*

Soumettons maintenant cette idée à l'épreuve de l'expérience. J'ai ici un vase de forme cubique, *c* (fig. 83), *un cube de*



Fig. 83.

Leslie, ainsi appelé parce que sir John Leslie s'en est servi dans ses belles recherches sur la chaleur rayonnante. Le cube est en fer-blanc, mais une de ses faces est revêtue d'une couche d'or, une autre d'argent, une troisième de cuivre, tandis que la quatrième est recouverte d'un vernis de colle de poisson. Je remplis le cube d'eau chaude, et le tenant à une distance constante de la pile thermo-électrique P, je fais rayonner successivement ses quatre faces vers la pile. La surface chaude de l'or, vous le voyez, produit à peine quelque déviation; celle de l'argent est également inactive; il en est de même de celle du cuivre; mais quand je tourne la face vernie du côté de la pile, le flux de cha-

eur augmente subitement; et l'aiguille, comme vous voyez, va butter contre ses arrêts. Nous concluons de là qu'en vertu de quelque cause physique ou autre, les molécules du vernis, lorsqu'elles sont mises en mouvement par l'eau chaude renfermée dans le cube, communiquent plus de mouvement à l'éther que les molécules des métaux. En d'autres termes, le vernis rayonne mieux que les métaux. J'obtiens un résultat semblable quand je compare cette théière d'argent avec ce pot de terre; en les remplissant tous les deux d'eau bouillante; l'argent, vous le voyez, ne produit que peu d'effet, tandis que le rayonnement de la terre est si abondant qu'il rejette l'aiguille à 90°. De même encore, si l'on compare ce pot d'étain et ce gobelet de verre, remplis tous deux d'eau chaude, le rayonnement du verre est bien plus puissant que celui de l'étain.

Vous avez souvent entendu parler des effets des couleurs sur le rayonnement, effets dont beaucoup sans doute n'ont pas été confirmés par l'expérience. J'ai ici un cube, dont une des faces est blanchie à la craie, une autre rougie au carmin, la troisième noircie au noir de fumée, tandis que la quatrième est restée nue. Je présente la surface noire la première à la pile, après avoir rempli le cube d'eau bouillante; l'aiguille se met en mouvement et s'arrête à 65°. Le cube est posé sur un petit guéridon, et faisant tourner le support je présente la face blanche à la pile; l'aiguille demeure stationnaire, prouvant ainsi que le rayonnement de la surface blanche est juste aussi abondant que celui de la face noire. Je dirige la face rouge vers la pile, il n'y a pas non plus de changement dans la position de l'aiguille. Je tourne enfin la face restée nue, l'aiguille retombe à l'instant, mettant ainsi en évidence l'infériorité de pouvoir rayonnant de la surface métallique. Je répète précisément les mêmes expériences avec ce second cube, dont trois faces sont revêtues : la première de velours noir, la seconde de velours blanc, la troisième de velours rouge. Les résultats sont précisément les mêmes que dans le premier exemple; les trois faces de velours rayonnent également, tandis que la face nue rayonne moins que chacune des faces de velours. Ces expériences montrent que

le rayonnement des vêtements du corps humain est indépendant de la couleur de ces vêtements; que la couleur de la fourrure d'un animal n'exerce pareillement aucune influence sur la radiation calorifique. Telles sont les conclusions auxquelles est arrivé Melloni *pour la chaleur obscure* [1].

Mais si la surface recouverte communique à l'éther plus de mouvement que celle qui ne l'est pas, il s'ensuit nécessairement que le vase recouvert se refroidira plus vite que celui qui ne l'est pas. J'ai ici deux cubes, dont l'un est entièrement recouvert de noir de fumée, tandis que l'autre est brillant. Au commencement de la leçon, j'ai versé de l'eau bouillante dans ces deux vases, et j'ai placé un thermomètre dans chacun d'eux. Il y a quelques instants, les thermomètres indiquaient la même température, maintenant l'un d'eux est à deux degrés au-dessous de l'autre. La vitesse du refroidissement dans l'un des vases est plus grande que dans l'autre, et le vase qui se refroidit le plus vite est celui qui est revêtu. Voici deux vases, l'un est brillant, et l'autre est revêtu de flanelle très-serrée. Il y a une demi-heure, deux thermomètres, plongés dans ces vases, indiquaient la même température, mais ils ne l'indiquèrent pas bien longtemps; le vase revêtu est à une température plus basse de deux ou trois degrés. On a coutume de conserver la chaleur d'une théière en l'entourant de laine, la précaution est bonne, mais à la condition que la couverture de laine restera très-lâche. Alors, en effet, et quoique la couverture rayonne bien, sa faculté rayonnante sera plus que compensée par la difficulté qu'éprouve la chaleur à atteindre la surface extérieure de la couverture. Une couverture, très-serrée, provoque, comme nous l'avons vu, la perte qu'on a l'intention de diminuer, et fait plus de mal que de bien.

Un des points les plus intéressants dans le domaine de la question que nous traitons est la réciprocité entre le pouvoir qu'a un corps de communiquer du mouvement à l'éther ou de

[1] En faisant usage de moyens d'épreuves plus puissants et plus délicats que ceux employés par Melloni, j'ai trouvé que ses conclusions avaient besoin d'être modifiées.

rayonner, et son aptitude à accaparer le mouvement de l'éther, ou à l'absorber. Pour ce qui concerne le rayonnement, nous avons déjà comparé le noir de fumée et la craie blanche aux surfaces métalliques; nous allons maintenant comparer les mêmes substances sous le rapport de leurs pouvoirs absorbants. J'ai ici deux feuilles de fer-blanc, MN, OP (fig. 84), dont l'une est

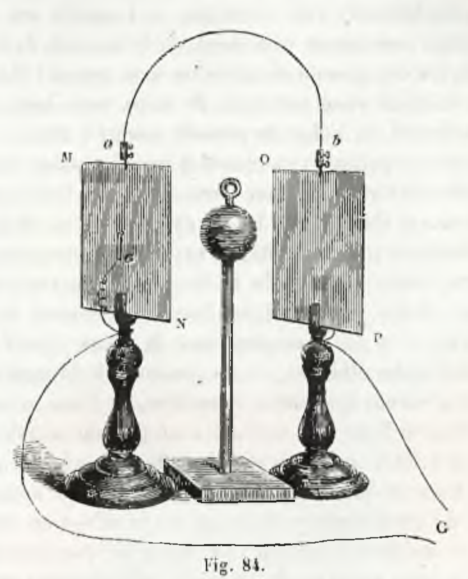


Fig. 84.

recouverte de blanc de chaux, et l'autre est restée nue; je les installe ainsi parallèles l'une à l'autre, et distantes d'environ 60 centimètres. Au bord de chaque feuille j'ai soudé une vis, et d'une vis à l'autre je tends un fil de cuivre, *ab*, qui maintenant unit les deux feuilles. Derrière chaque feuille j'ai fixé l'extrémité d'une petite barre de bismuth, et à la seconde extrémité de ces barres je fixe deux fils, terminés par deux vis de pression. A ces deux vis de pression aboutissent les deux extrémités du fil de mon galvanomètre en G; j'obtiens ainsi un circuit fermé dont le galvanomètre fait partie. Vous savez déjà quelle est la desti-

nation des barreaux de bismuth. Je place mon doigt chaud sur le barreau de gauche, il naît aussitôt un courant qui va du bismuth à l'étain, traverse le fil qui relie les deux feuilles, arrive au galvanomètre, et revient au point d'où il était parti. Remarquez l'effet produit. L'aiguille du galvanomètre décrit un grand arc, et son extrémité rouge marche vers vous. La soudure de l'étain et du bismuth s'est refroidie, et l'aiguille est revenue à 0°. Je place maintenant mon doigt sur le bismuth de droite, et le résultat est une grande déviation en sens opposé; l'extrémité rouge de l'aiguille vient vers moi. Je retire mon doigt, la soudure se refroidit, et l'aiguille retombe encore à zéro.

Je dresse un support exactement à moitié chemin, entre les deux feuilles de fer-blanc, avec l'intention de lui faire porter une boule de cuivre chauffée; la boule rayonnera de sa chaleur vers les deux feuilles; mais, à droite, les rayons frapperont une surface recouverte, tandis qu'à gauche ils frapperont une surface métallique nue. Si les deux surfaces boivent également la chaleur rayonnante, — si elles acceptent avec la même liberté le mouvement des ondes éthérées, — les soudures de bismuth au dos des feuilles seront également échauffées, et l'une neutralisera l'autre. Mais si l'une des surfaces a un pouvoir absorbant plus grand que l'autre, celle qui absorbera le plus échauffera davantage son bismuth indicateur; il en résultera une déviation de l'aiguille du galvanomètre, et le sens de la déviation nous dira quel est le meilleur absorbant. La boule est maintenant sur le support, et vous voyez que la décision de la question ne se fait pas longtemps attendre. La prompte et énergique déviation de l'aiguille nous apprend que la surface recouverte est le plus puissant des deux absorbants. J'ai comparé de la même manière le noir de fumée et le vernis avec l'étain, et j'ai trouvé que les deux premiers sont de beaucoup les meilleurs absorbants[1].

La plus mince des couches métalliques constitue un puissant obstacle à l'absorption de la chaleur rayonnante. J'ai ici une

[1] La couleur, selon Melloni, n'a pas d'influence sur l'absorption de la *chaleur obscure*, mais elle en a une grande sur la chaleur lumineuse, sur celle du soleil, par exemple.

feuille de papier doré, c'est-à-dire de papier simplement recouvert de cuivre réduit très-fin. Avec cette poudre rouge, d'iodure de mercure, je recouvre la surface inférieure de papier doré. La couleur de cet iodure, comme beaucoup d'entre vous le savent, est détruite par la chaleur, c'est-à-dire que la poudre passe du rouge au jaune pâle. Je mets le papier à plat sur cette table, avec la face colorée en dessous, et sur la surface métallique restée en haut je colle des morceaux de papier, le papier à lettres ordinaire suffit très-bien à mon but. Je forme ainsi à la surface du cuivre une figure de forme voulue. Je prends maintenant dans la main un fer à repasser, chauffé au rouge, et je le passe plusieurs fois au-dessus de la feuille ; le fer rayonne fortement contre la feuille, mais j'ai lieu de croire que ses rayons seront absorbés à des degrés très-différents. La surface métallique absorbera bien peu ; les surfaces de papier absorberont avidement : en retournant la feuille, vous voyez l'effet produit ; l'iodure, protégé par la surface métallique, n'a pas du tout changé de couleur, tandis que sous chaque morceau de papier la couleur est détruite ; formant ainsi en dessous une copie exacte de la figure tracée à la surface opposée de la feuille. Voici un autre exemple du même genre, dont je suis redevable à M. Hill, attaché à l'établissement de M. Jacob Bell, dans Oxfort Street. Un feu ardent dardait ses rayons contre ce morceau de bois peint (fig. 85), sur

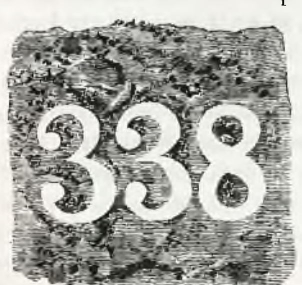


Fig. 85.

lequel le nombre 338 est tracé en chiffres découpés dans des feuilles d'or ; la peinture est boursouflée et carbonisée sur tout

le contour des lettres, tandis que sous les lettres le bois et la peinture n'ont éprouvé aucune altération. La mince pellicule d'or a tout à fait suffi pour empêcher l'absorption, à laquelle est due la destruction de la surface environnante.

L'éther luminifère remplit les espaces stellaires; il fait de l'univers un tout et rend possible d'étoile à étoile l'échange incessant de lumière et d'énergie. Mais cette substance si subtile pénètre plus loin encore, elle entoure les derniers atomes des substances solides et liquides.. Certains corps sont transparents, parce que l'éther et leurs atomes sont entre eux dans des rapports tels que les ondes qui produisent la lumière passent entre leurs atomes sans leur céder le mouvement dont elles sont animées. Dans les corps colorés, certaines ondes sont arrêtées ou absorbées; mais celles qui donnent au corps sa couleur passent sans perte. Par exemple, les ondes bleues traversent sans empêchement aucun cette solution de sulfate de cuivre, tandis que les ondes rouges sont éteintes. Je projette un spectre sur l'écran à travers cette solution, et vous voyez que l'extrémité rouge du spectre est interceptée. Ce morceau de verre rouge, au contraire, doit sa couleur à ce fait que sa substance peut être traversée librement par les ondulations plus longues du rouge, tandis que les ondes plus courtes sont absorbées. Quand je l'interpose sur le passage du spectre, vous voyez qu'il arrête complétement l'extrémité bleue du spectre, et qu'il ne laisse sur l'écran qu'une simple bande d'un rouge vif. Le liquide bleu intercepte donc les rayons transmis par le verre rouge, et le verre rouge intercepte les rayons transmis par le liquide. La réunion du liquide et du verre doit donc produire une opacité parfaite, et nous l'obtenons en effet. Placés tous les deux sur le passage du faisceau, ils font disparaître le spectre tout entier, la superposition de ces deux corps transparents détermine une opacité égale à celle de la poix ou du charbon. Voici un autre liquide, une solution de permanganate de potasse; je l'introduis sur le passage du faisceau lumineux, et voyez son effet sur le spectre ; les deux rayons extrêmes passent librement, vous avez le rouge et le bleu; mais l'espace entre ces deux couleurs est d'un noir intense. Le jaune du spectre

est impitoyablement détruit par ce liquide; l'entortillement de ses atomes est tel que les rayons jaunes ne peuvent pas s'en tirer, tandis que le rouge et le bleu glissent autour de ces mêmes atomes et s'ouvrent passage sans obstacle sensible à travers les espaces intratomiques. De là la couleur magnifique de ce liquide. Je vais faire tourner la lampe et projeter un disque de lumière de 60 centimètres de diamètre sur l'écran. J'interpose maintenant la solution de permanganate de potasse. Peut-on voir quelque chose de plus splendide que la nuance dont il colore le disque lumineux. Je ramène la lampe à une position oblique, et j'interpose un prisme qui montre isolées les composantes de cette belle couleur ; le violet s'est dégagé du rouge. Vous apercevez sur l'écran deux disques séparés de ces deux couleurs, qui, se superposant vers le centre, reproduisent la couleur de la lumière composée qui passe à travers le liquide.

Donc, pour ce qui concerne les ondes lumineuses, les corps exercent comme un pouvoir d'élection, séparant certaines ondes pour les détruire, et laissant passer les autres. La transparence pour une onde n'implique pas du tout la transparence pour les autres ondes, et nous pouvons raisonnablement conclure de ce fait que la transparence pour la lumière n'implique pas la transparence pour la chaleur rayonnante. Cette conclusion est entièrement vérifiée par l'expérience. J'ai ici un écran en fer-blanc MN (fig. 86), percé d'une ouverture, et au dos duquel on a fixé une planchette S. Je place cette boule de cuivre B, chauffée au rouge sombre, sur un chandelier, qui lui servira de support. De l'autre côté de l'écran, je place ma pile thermo-électrique P; les rayons émanés de la boule passent maintenant à travers l'ouverture de l'écran et tombent sur la pile, l'aiguille marche et s'arrête enfin, avec une déviation stable de 80°. Voici une auge en verre, épaisse de 8 millimètres, que je remplis d'eau distillée. Je place cette auge sur la planchette S, de telle sorte que tous les rayons qui arrivent à la pile doivent la traverser; qu'arrive-t-il? L'aiguille revient presque à zéro; c'est à peine si un des rayons émis par la boule peut traverser cette eau ; pour les ondulations émanées de la boule, l'eau distillée est donc réelle-

ment opaque, bien qu'elle soit si parfaitement transparente pour la lumière. Avant de retirer l'auge remplie d'eau, j'installe derrière elle une seconde auge semblable, mais contenant du

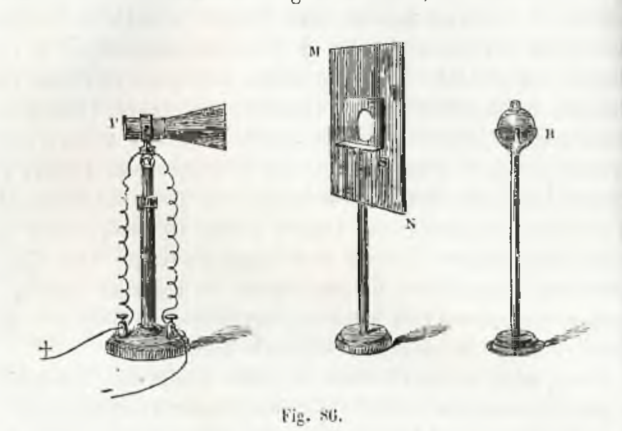


Fig. 86.

bisulfure transparent de carbone, de sorte que quand j'enlèvera l'eau, l'ouverture reste fermée par le nouveau liquide. Que se passe-t-il quand l'eau est partie? L'aiguille marche rapidement et décrit un grand arc, les mêmes rayons pour lesquels l'eau était impénétrable trouvent un accès facile à travers le bisulfure de carbone. Je compare de la même manière cet alcool avec ce chlorure de phosphore, et je trouve le premier presque opaque aux rayons émis par la boule chaude, tandis que le second les laisse passer librement.

Il en est de même des corps solides. Voici une plaque de verre très-pur que je place sur la tablette, et, me servant d'un cube d'eau chaude au lieu de la boule B, je laisse les rayons émanés du cube traverser cette plaque, s'ils le peuvent. On n'aperçoit aucun mouvement de l'aiguille. Je remplace la plaque de verre par une plaque de sel gemme dix fois plus épaisse, et vous voyez avec quelle promptitude l'aiguille fuit jusqu'à la rencontre de ses arrêts. Pour ces rayons, le sel gemme est donc éminemment transparent, tandis que le verre est pour eux réellement opaque.

Nous sommes redevables de ces résultats et d'une foule d'autres à Melloni, qui peut être considéré comme le créateur de cette branche du sujet que nous traitons. Pour exprimer ce pouvoir de transmission instantanée de la chaleur rayonnante, il a proposé le mot *diathermancie*. La diathermancie a, par rapport à la chaleur rayonnante, le même sens que la transparence, par rapport à la lumière. Au lieu de vous donner des déterminations faites par moi de la diathermancie de différents corps, j'ai fait un choix dans les tables de l'éminent physicien italien que je viens de citer. Dans ces déterminations, Melloni a employé quatre sources différentes de chaleur : la flamme d'une lampe de Locatelli, une spirale de fil de platine, rendue incandescente par la flamme d'une lampe à alcool, une plaque de cuivre chauffée à 400°, et une plaque de cuivre chauffée à 100° ; cette dernière source était la surface d'un cube de cuivre contenant de l'eau bouillante. Les expériences ont été faites de la manière suivante : On mesurait d'abord le rayonnement de la source, c'est-à-dire la déviation du galvanomètre produite par elle, lorsque l'air ambiant était seul interposé entre la source et la pile. On introduisait alors la substance dont on avait à déterminer la diathermancie, et l'on notait la déviation résultant de cette interposition. En désignant par 100 la quantité de chaleur représentée par la première déviation, les quantités de chaleur relativement transmises par vingt-cinq substances différentes sont données par le tableau suivant :

NOMS DES SUBSTANCES RÉDUITES A UNE ÉPAISSEUR COMMUNE de un pouce (2,6 millièmes).	TRANSMISSIONS EN CENTIÈMES DU RAYONNEMENT TOTAL.			
	LAMPE Locatelli.	PLATINE incandescent	CUIVRE à 400° c.	CUIVRE à 100° c.
1 Sel gemme.	92,3	92,3	92,3	92,3
2 Soufre de Sicile.	74	77	60	54
3 Spath fluor.	72	69	42	33
4 Béril.	54	23	13	0
5 Spath d'Islande	39	28	6	0
6 Verre.	39	24	6	0
7 Cristal de roche (limpide).	38	28	6	3
8 Quartz enfumé.	37	28	6	3
9 Chromate de potasse. . .	34	28	15	0
10 Topaze blanche.	33	24	4	0
11 Carbonate de plomb. . .	32	23	4	0
12 Sulfate de baryte. . . .	24	18	3	0
13 Feldspath.	23	19	6	0
14 Améthyste (violette). . .	21	9	2	0
15 Ambre artificiel.	21	5	0	0
16 Borate de soude.	18	12	8	0
17 Tourmaline (vert foncé). .	18	16	3	0
18 Gomme commune. . . .	18	3	0	0
19 Sélénite.	14	5	0	0
20 Acide citrique.	11	2	0	0
21 Tartrate de potasse . . .	11	3	0	0
22 Ambre naturel.	11	5	0	0
23 Alun.	9	2	0	0
24 Sucre candi.	8	1	0	0
25 Glace.	6	0,5	0	0

Ce tableau montre en premier lieu, combien sont différents les pouvoirs de transmission des différents corps solides. Il nous montre aussi, à une seule exception près, que la transparence des corps dont il s'agit pour la chaleur rayonnante varie avec la qualité de cette chaleur. Le sel gemme seul est également transparent pour la chaleur des quatre sources mises en action. Il faut avoir présent à l'esprit que les rayons lumineux sont aussi des rayons calorifiques; que les mêmes rayons qui en tombant sur les nerfs de la vision, produisent la sensation de lumière, sont ceux qui en excitant d'autres nerfs du corps produisent la sensation de chaleur. Les rayons calorifiques lumineux ont toutefois une longueur d'onde plus courte que celle des rayons obscurs;

et sachant comme nous le faisons, combien diversement les ondes de longueur diverses sont absorbées par les corps, nous étions jusqu'à un certain point, préparés aux résultats mis en évidence par le tableau qui précède. Ainsi, tandis que le verre, de l'épaisseur indiquée, laisse passer 39 pour cent des rayons d'une lampe de Locatelli, et 26 pour cent des rayons du platine incandescent, il ne livre passage qu'à 6 pour cent des rayons du cuivre à la température de 400° C., et il est absolument opaque aux rayons émanant d'une source à 100° C. Nous voyons encore que la glace limpide, qui est si excessivement transparente pour la lumière, ne laisse passer que 6 pour cent des rayons de la lampe, et 0,6 pour cent des rayons émis par le platine incandescent, tandis qu'elle est complétement opaque pour les rayons émanant des deux autres sources. Cette différence nous conduit à penser que, le plus grand nombre des rayons émis par la lampe de Locatelli doivent être obscurs. Si, en effet, les rayons lumineux traversent une plaque de glace de l'épaisseur donnée, sans absorption sensible, tandis que 94 pour cent des rayons émanant de la flamme de Locatelli sont éteints par elle, c'est une preuve que ces 94 pour cent sont de la chaleur obscure. Au point de vue de l'influence exercée par la transparence, le quartz limpide et le quartz enfumé sont très-instructifs. De ces deux substances, l'une est parfaitement transparente, l'autre est d'un brun obscur ; cependant, ce n'est que pour les rayons lumineux que ces deux échantillons manifestent une différence de transmission. Le quartz limpide transmet 38 pour cent, et le quartz enfumé 37 pour cent des rayons de la lampe, tandis que, pour les trois autres sources, les transmissions à travers les deux substances sont identiques.

Le tableau suivant, que j'emprunte encore à Melloni, donne les transmissions calorifiques de différents liquides. La source de chaleur était une lampe d'Argant, munie d'une cheminée de verre, et les liquides étaient renfermés dans une auge à parois de verre, l'épaisseur de la couche liquide étant de 9,21 millimètres.

Noms des liquides.	Transmissions calorifiques pour 100 parties du rayonnement total.
Bisulfure de carbone	63
Bichlorure de soufre	63
Protochlorure de phosphore . . .	62
Essence de térébenthine.	31
Huile d'olive.	30
Naphte	28
Essence de lavande	26
Éther sulfurique.	21
Acide sulfurique	17
Hydrate d'ammoniaque	15
Acide nitrique	15
Alcool absolu	15
Hydrate de potasse	13
Acide acétique.	12
Acide pyroligneux	12
Solution concentrée de sucre. . .	12
Solution de sel gemme	12
Blanc d'œuf.	11
Eau distillée.	11

On voit que les liquides diffèrent autant que les solides dans leurs pouvoirs de transmission, et il est aussi digne de remarque que l'eau maintient son opacité, nonobstant le changement qu'elle a subi dans l'état d'agrégation de ses molécules.

La réciprocité entre le rayonnement et l'absorption que nous avons déjà mise en évidence dans le cas des métaux, des vernis, etc., peut maintenant être étendue aux corps contenus dans les tableaux de Melloni. Je me contenterai d'un ou deux exemples empruntés à M. Balfour Stewart. Voici un vase de cuivre dans lequel de l'eau est maintenue dans un état d'ébullition légère. Sur le couvercle plat de cuivre de ce vase, je place des plaques de verre et de sel gemme, et les y laisse jusqu'à ce qu'elles aient pris la température du couvercle. Je mets la plaque de sel gemme sur ce support, en face de la pile thermo-électrique. Remarquez la déviation; elle est si petite qu'elle est à peine sensible. Je retire maintenant le sel gemme, et je mets à sa place la plaque de verre chauffé; l'aiguille se meut et parcourt un grand arc, montrant ainsi d'une manière concluante que le verre, qui absorbe le plus

la chaleur obscure, est aussi celui qui en rayonne le plus. L'alun, malheureusement, se fond à une température plus basse que celle à laquelle nous opérons ici ; mais quoique sa température ne soit pas aussi élevée que celle du verre, l'action exercée par lui sur le galvanomètre est encore plus énergique que celle exercée par le verre.

L'absorption se fait dans l'intérieur du corps absorbant ; et pour qu'elle ait lieu, il faut que le corps ait une certaine épaisseur. Cela est vrai de la lumière et de la chaleur rayonnante. Une couche très-mince de bière pâle est presque aussi incolore qu'une couche d'eau, l'absorption étant trop peu considérable pour faire naître la couleur prononcée d'une plus grande épaisseur de bière. Je verse de l'eau distillée dans un verre à boire ; sa quantité ou son épaisseur sont trop petites pour qu'elle présente aucune trace de couleur, mais j'ai tout disposé pour une expérience destinée à prouver que ce liquide si limpide prend une teinte décidée, quand son épaisseur est suffisante. Voici un tube de 5 mètres de longueur (A B, fig. 87), placé horizontalement, et dont les

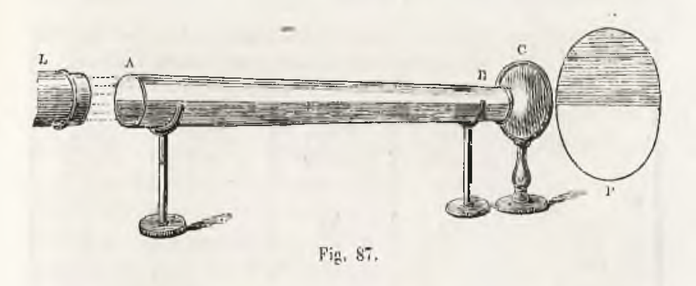


Fig. 87.

extrémités sont fermées par des disques de verre plat. Devant une des extrémités du tube j'ai installé une lampe électrique destinée à envoyer un faisceau cylindrique de lumière à travers le tube. Le tube est maintenant à demi rempli d'eau, et le niveau de l'eau le partage horizontalement en deux parties égales. De cette manière la moitié de mon faisceau de lumière passera à travers l'air et l'autre moitié à travers l'eau ; puis, avec cette lentille C, je

projetterai une image nette et agrandie de l'orifice adjacent du tube sur l'écran. C'est fait. Vous voyez l'image, OP, formée de deux demi-cercles éclairés, l'un par la lumière qui a traversé l'eau, l'autre par la lumière qui a traversé l'air.

Accolés comme ils le sont, vous pouvez les comparer, et vous remarquez que tandis que le demi-cercle de l'air est d'un blanc pur, le demi-cercle de l'eau est d'un bleu tendre, mais brillant. Ainsi, en augmentant l'épaisseur que doit traverser la lumière, vous renforcez la couleur; ce qui prouve que la destruction des rayons lumineux a lieu *dans l'intérieur* du corps absorbant, et qu'elle n'est pas simplement un effet de surface. Melloni montre qu'il en est de même de la chaleur rayonnante. Dans la table de la page 290, l'épaisseur des plaques employées était de 2,6 millimètres, en les rendant plus minces, nous les rendrions aptes à laisser passer une plus grande quantité de chaleur; et en les amincissant suffisamment nous pourrions faire qu'une substance très-opaque, atteignît presque la transmission du sel gemme. Le tableau suivant montre l'influence de l'épaisseur sur le pouvoir de transmission d'une plaque de verre.

ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE en millimètres.	Transmissions à travers du verre de différentes épaisseurs, pour 100 parties du rayonnement total.			
	LAMPE Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE à 400° C.	CUIVRE à 100° C.
2,6	39	24	6	0
0,5	54	37	12	1
0,07	77	57	34	12

Nous voyons donc qu'en réduisant l'épaisseur de la plaque de 2,6 à 0,07 millimètres, la quantité de chaleur transmise, s'élève, dans le cas de la lampe de Locatelli, de 39 à 77 pour cent; dans le cas du platine incandescent, de 24 à 57; dans le cas du cuivre à 400° C. de 6 à 34; et dans le cas enfin du cuivre à 100° C., de l'opacité absolue à une transmission de 12 pour cent.

L'influence de l'épaisseur d'une plaque de sélénite, sur la quantité de chaleur qu'elle transmet, est indiquée dans le tableau suivant :

ÉPAISSEUR DE LA PLAQUE en millimètres.	Transmissions à travers de la sélénite de différentes épaisseurs, pour 100 parties du rayonnement total.			
	LAMPE Locatelli.	PLATINE incandescent.	CUIVRE à 400° c.	CUIVRE à 100° c.
2,6	14	5	0	0
0,4	38	18	7	0
0,1	64	51	52	21

La décomposition d'un faisceau de lumière solaire nous donne le spectre solaire, lumineux au centre, calorifique à une extrémité, et chimique à l'autre extrémité. Le soleil est, par conséquent, une source de rayons hétérogènes, et l'on ne saurait guère douter que cette hétérogénéité se retrouvera dans toutes les autres sources de chaleur lumineuse ou obscure. En général, quand un faisceau de rayons ainsi mélangés pénètre dans une substance diathermane, quelques-uns des rayons sont arrêtés ou éteints, tandis que les autres passent librement. Si donc nous prenons un faisceau de rayons calorifiques, ayant déjà traversé une plaque diathermane, et que nous le fassions tomber sur une seconde plaque de la même substance, la transparence de cette seconde plaque pour la chaleur déjà transmise sera plus grande que la transparence de la première plaque pour la chaleur primitive. En effet, la première plaque, si elle était suffisamment épaisse, a déjà éteint en grande partie les rayons que la substance est capable d'absorber, et les rayons restant traverseront naturellement avec une liberté plus grande une seconde plaque de la même substance. Le faisceau primitif a été comme *tamisé* par la première plaque, et le faisceau ainsi purifié possède, relativement à la même substance, un pouvoir de pénétration plus grand que le faisceau primitif.

Ce pouvoir de pénétration est considéré ordinairement comme la pierre de touche de la qualité de la chaleur, c'est-à-dire qu'on dit que la chaleur du faisceau tamisé et purifié est de qualité différente de celle du faisceau non purifié. Ce n'est pas toutefois qu'aucun des rayons individuels ait changé de nature, mais seulement que du faisceau, pris comme un tout, certains rayons ont été soustraits, et que leur soustraction a modifié la proportion de la chaleur incidente qui aurait dû être transmise par une seconde substance. Tel est, je pense, le vrai sens du mot « qualité » appliqué à la chaleur rayonnante. Plaçons successivement sur le passage des rayons d'une lampe des plaques de sel gemme, d'alun, de bichromate de potasse et de sélénite, chaque plaque ayant 2,6 millimètres d'épaisseur, faisons tomber la chaleur qui émerge de ces plaques sur une seconde série de plaques de même substance, de même épaisseur, et nous constaterons que sur cent rayons de chaleur déjà transmise, les secondes plaques en laisseront passer.

Sel gemme	92,5
Alun	90
Chromate de potasse . . .	71
Sélénite.	91

En nous reportant au tableau, p. 290, nous trouvons que de la totalité des rayons émis par la lampe Locatelli, 34 pour cent seulement étaient transmis par le bichromate de potasse ; ici nous trouvons 71 pour cent. La sélénite ne transmettait que 14 pour cent de la radiation primitive ou totale, tandis qu'elle transmet 91 pour cent du faisceau qui a été purifié par le passage à travers une plaque de sa propre substance. La même remarque s'applique à l'alun, qui ne transmet que 9 pour cent du faisceau non purifié, et 90 pour cent du faisceau purifié. Pour le sel gemme, au contraire, les transmissions du faisceau tamisé et du faisceau non tamisé sont les mêmes, parce que cette substance est également transparente pour toute espèce de rayons[1]. J'ai supposé, dans ce qui précède, que les rayons émer-

[1] Telle était la conclusion de Melloni; mais les expériences de MM. de

gents du sel gemme repassaient à travers le sel gemme; que les rayons émergents de l'alun retraversaient l'alun, et ainsi des autres; mais, comme on doit s'y attendre, le tamisage du faisceau, par une première substance quelconque modifie notablement la proportion des rayons transmis par presque toutes les autres substances qu'il traversera ensuite.

Je termine ces observations par une expérience qui vous montrera d'une manière frappante l'influence du tamisage. Voici un thermomètre différentiel très-sensible avec boule en verre très-limpide. Vous voyez que le plus léger contact de ma main occasionne une dépression de la colonne thermométrique. Recourant à notre lampe électrique, je vais faire tomber sur la boule de ce thermomètre un puissant faisceau de lumière convergente. La boule est actuellement bien au foyer de la lentille, et l'air qu'elle contient est traversé par un faisceau de chaleur intense; et, cependant, vous n'apercevez pas la plus légère dépression de la colonne thermométrique. Lorsque je fis voir d'abord cette expérience à une personne ici présente, elle douta presque du témoignage de ses sens, et pourtant l'explication de ce fait est très-simple. Le faisceau, avant d'arriver à la boule, est déjà tamisé par la lentille de verre employée à le rendre convergent, et, après avoir traversé 4 ou 5 mètres d'air, il a presque entièrement perdu les rayons qui pourraient être absorbés par l'air intérieur de la boule. Voilà pourquoi le faisceau chaud passe à travers l'air et le verre, sans échauffer ni l'un ni l'autre. Il est très-apte cependant à échauffer la pile thermo-électrique; car il suffit de la lui présenter un seul instant pour que l'aiguille soit violemment chassée; ou plutôt laissez-moi recouvrir de noir de fumée la partie de la boule frappée par le faisceau, et vous verrez l'effet produit : la chaleur est absorbée, l'air se dilate, et la colonne thermométrique est fortement déprimée.

Nous nous servons pour le feu d'écrans en verre qui laissent passer la lumière agréable du foyer, tandis qu'ils arrêtent la cha-

la Provostaye et Desains, et de M. Balfour Stewart, prouvent que cette conclusion n'est pas absolument exacte.

leur; la raison en est que la portion de beaucoup la plus grande de la chaleur émise par le feu consiste en rayons obscurs pour lesquels le verre est opaque. En réalité, il n'y a rien de perdu, les rayons absorbés par le verre vont l'échauffer, le mouvement des ondes de l'éther passera aux molécules solides. Mais s'il en est ainsi, direz-vous peut-être, l'écran de verre lui-même va devenir une source de chaleur, et, par conséquent, nous ne tirerons aucun bénéfice de son absorption. Le fait est vrai; mais la conclusion que vous en tirez n'est pas rigoureuse. La théorie physique de l'écran est celle-ci : Soit F (fig. 88) un feu dont les

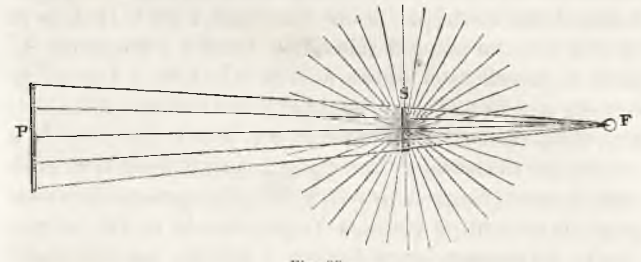


Fig. 88.

rayons se dirigent en ligne droite vers une personne situé en P. Quand l'écran n'existe pas, chaque rayon poursuit sa marche directement vers P. Dressons maintenant l'écran en S. L'écran intercepte les rayons de chaleur et s'échauffe; mais au lieu de renvoyer les rayons seulement dans leur direction première. il les émet, comme corps chaud, dans toutes les directions. Voilà pourquoi il ne peut pas rendre à la personne en P toute la chaleur interceptée. Une portion de cette chaleur est restituée, mais la portion de beaucoup la plus grande est détournée de P, et distribuée dans d'autres directions.

Tant que les ondes poursuivent leur marche sans être absorbées, il n'y a aucune communication ou cession du mouvement qui constitue la chaleur, comme nous avons vu dans le cas du thermomètre à air. Tandis qu'un quartier de viande est rôti par l'action du foyer, l'air qui l'environne peut rester aussi froid que

la glace. L'air sur les hautes montagnes peut être excessivement froid, quoique le soleil darde ses rayons brûlants. Les rayons solaires qui, dans leur contact avec la peau humaine, sont presque douloureux, restent impuissants à échauffer l'air d'une manière sensible ; il suffit de se mettre parfaitement à l'ombre pour sentir le froid de l'atmosphère. Jamais, dans aucune circonstance, je n'ai tant souffert de la chaleur solaire qu'en descendant du *Corridor*, au *grand plateau du Mont-Blanc*, le 13 août 1857; pendant que je m'enfonçais dans la neige jusqu'aux reins, le soleil dardait ses rayons sur moi avec une force intolérable. Mon immersion dans l'ombre du dôme du Gouté changea à l'instant mes impressions, car là l'air était à la température de la glace. Il n'était pourtant pas sensiblement plus froid que l'air traversé par les rayons du soleil ; et je souffrais, non pas du contact de l'air chaud, mais du choc des rayons calorifiques lancés contre moi à travers un milieu froid comme la glace.

Les rayons du soleil pénètrent aussi le verre sans l'échauffer sensiblement, et la raison en est qu'après avoir traversé l'atmosphère terrestre, la chaleur solaire a été en grande partie privée des rayons absorbables par le verre[1]. J'ai fait dans une précédente leçon une expérience que vous devez maintenant comprendre parfaitement. J'ai fait passer un faisceau de lumière électrique à travers une masse de glace sans la fondre. J'avais préalablement tamisé le faisceau en lui faisant traverser un vase rempli d'eau, qui avait gardé les rayons susceptibles d'être absorbés par la glace, et les avait gardés en si grande abondance, que cette eau, pendant l'expérience, avait presque atteint la température du point d'ébullition. Il est digne de remarque que l'eau liquide et la glace solide paraissent être perméables et im-

[1] Par des raisons *à priori* j'avais dû conclure que les rayons obscurs du soleil qui ont échappé à l'absorption de notre atmosphère, devaient être capables de pénétrer les humeurs de l'œil et d'arriver à la rétine ; les expériences récentes de M. Frantz prouvent qu'il en est ainsi. S'ils ne produisent pas la vision, ce n'est donc pas qu'ils soient absorbés par les humeurs de l'œil, mais c'est à cause de leur impuissance intrinsèque à exciter la rétine.

perméables aux mêmes rayons; l'une peut servir de *tamis* pour l'autre; et ce fait prouve que la *qualité* de l'absorption n'est pas influencée par la différence d'agrégation entre le solide et le liquide. Il est facile de prouver, en le faisant tomber sur notre pile thermo-électrique, que le faisceau qui a traversé la glace sans la fondre, est réellement un faisceau calorifique. Voici un faisceau qui a passé à travers une couche d'eau; je le fais tomber sur la pile, et vous voyez à l'instant comment il agit sur le galvanomètre; il fait butter énergiquement l'aiguille contre ses arrêts; ce second faisceau a traversé la glace, et vous voyez qu'il est également capable d'influencer la pile; le troisième faisceau, enfin, qui a traversé tour à tour l'eau et la glace, n'en possède pas moins la faculté d'échauffer [1].

Lorsque les rayons calorifiques sont interceptés, ils élèvent, en règle générale, la température du corps qui les a absorbés; mais quand le corps absorbant est de la glace à zéro, il est impossible d'élever sa température. A quoi la chaleur absorbée par la glace sera-t-elle alors employée? Elle produit une liquéfaction intérieure, elle détache les molécules cristallines, et forme ainsi ces belles fleurs liquides que je vous ai montrées dans une précédente leçon [2].

Nous avons vu que la transparence pour la lumière n'est pas du tout une preuve de diathermancie; qu'un corps parfaitement transparent pour les ondulations lumineuses peut être parfaitement opaque pour les ondulations non lumineuses. Je vous ai donné aussi un exemple de genre opposé; je vous ai montré qu'un corps absolument opaque pour la lumière peut être transparent pour la chaleur à un degré considérable. Je mets la lampe électrique en action, et vous voyez ce faisceau convergent marquer sa trace à travers la poussière de la salle; vous apercevez le point de convergence des rayons, ici, à une distance de 5 mètres de la lampe; je vais marquer ce point avec soin, en y

[1] M. Faraday a enflammé de la poudre en faisant converger sur elle les rayons solaires avec une lentille de glace.

[2] Pour la manière dont se comportent l'air et les bulles d'eau de la glace voyez l'appendice à la leçon IX.

fixant le bout de cette baguette. Voici une plaque de sel gemme, recouverte d'une couche de suie si épaisse, qu'elle arrête entièrement, non-seulement la lumière des becs de gaz de la salle, mais la lumière électrique elle-même. J'interpose cette plaque de sel enfumé sur le passage du faisceau; la lumière est interceptée; mais la baguette me permet de trouver avec ma pile le lieu où tombe le foyer. J'y place la pile; vous ne voyez tomber sur elle aucun rayon, mais l'impulsion violente, imprimée à l'aiguille, révèle instantanément aux yeux de l'esprit la présence d'un foyer de chaleur, au point que la lumière a abandonné.

Vous serez peut-être disposés à penser que la chaleur tombant sur la pile a été d'abord absorbée par la suie qui la ferait ensuite rayonner comme source indépendante. Melloni n'a laissé place à aucune objection de cette espèce; mais aucune de ses expériences n'est, je crois, plus concluante, ou ne réfute mieux cette objection, que celle que je fais maintenant devant vous. Car, si le sel enfumé était la source, les rayons ne convergeraient plus à ce foyer, puisque le sel est en avant de la lentille convergente; et vous voyez que quand je déplace un peu ma pile latéralement, sans cesser de la tourner vers le sel enfumé, l'aiguille revient à zéro. En outre, la chaleur qui tombe sur la pile est, comme Melloni l'a montré, réellement indépendante de la position de la plaque de sel gemme; vous pouvez couper le faisceau à une distance de cinq mètres ou à la distance d'un décimètre de la pile; le résultat est sensiblement le même; ce qui n'aurait pas lieu si le sel enfumé était lui-même la source de chaleur.

Je fais une expérience semblable avec ce verre noir, et le résultat, comme vous voyez, est le même. Actuellement, il renvoie par réflexion une portion considérable de la lumière et de la chaleur venues de la lampe; pour vous faire apercevoir cette portion réfléchie, il suffit que je rende le verre un peu oblique au faisceau incident. Pendant que le verre est dans cette position, je vais le recouvrir d'une couche de noir de fumée, de manière à lui faire absorber, non-seulement tous les rayons qui le pénètrent, mais encore la portion qu'il réfléchit. Qu'en est-il résulté? Quoique

la plaque de verre soit devenue le siége d'une absorption accrue, elle cesse d'affecter la pile, l'aiguille revient à zéro, prouvant ainsi une fois de plus que les rayons qui, en premier lieu, agissaient sur la pile, venaient directement de la lampe, et traversaient le verre noir, comme la lumière traverse une substance transparente.

Le sel gemme transmet tous les rayons lumineux et obscurs; l'alun, quand son épaisseur est celle que nous avons indiquée, transmet seulement les rayons lumineux; d'où il suit que la différence entre les absorptions de l'alun et du sel gemme donnera la mesure de la radiation obscure. En procédant de cette manière, Melloni a trouvé que les proportions des rayons lumineux et obscurs, pour les trois sources mentionnées, étaient :

Source.	Lumineux.	Obscure.
Flamme d'huile	10	90
Platine incandescent.. . .	2	98
Flamme d'alcool	1	99

Ainsi, 90 pour cent de la chaleur rayonnée par la flamme d'huile, sont des rayons obscurs; pour le platine incandescent, la proportion de rayons obscurs est de 98 pour cent; pour l'alcool, enfin, cette même proportion s'élève à 99 pour cent.

APPENDICE A LA LEÇON IX

EXTRAIT D'UN MÉMOIRE SUR QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE LA GLACE[1]

§ Ier

J'ai profité du beau soleil, dont nous avons été favorisés pendant les mois de septembre et d'octobre derniers, pour observer les effets de la chaleur solaire sur la glace. Les expériences ont été faites avec de la glace du lac Wenham et de Norwége. On taillait dans la glace des plaques de 2 à 10 centimètres d'épaisseur, et on les plaçait sur le passage d'un faisceau rendu convergent par une lentille biconvexe de 4 pouces de diamètre, de 10 pouces et demi de distance focale. Les plaques étaient ordinairement placées de telle sorte que le foyer des rayons parallèles tombât dans l'intérieur de la glace. Quand on avait trouvé la position du foyer dans l'air, on dressait un écran derrière la lentille; on mettait la plaque de glace en place, on retirait l'écran, et l'on observait l'effet avec une loupe ou microscope de poche ordinaire.

On soumet d'abord à l'examen une plaque de glace de 2 centimètres et demi d'épaisseur, à faces parallèles. L'écran étant retiré, le faisceau lumineux traverse la lame transparente, et son passage à travers la masse se montre aussitôt dessiné par un grand nombre de petites taches lumineuses produites instantanément et ressemblant à des bulles d'air brillantes. Lorsque l'on faisait passer le faisceau par la tranche de la plaque, de manière à lui faire traverser une grande épaisseur de

[1] *Phil. Trans.*, décembre 1857.

glace, sa route apparaissait tracée par la série de taches brillantes, comme elle l'est par les atomes qui flottent dans une chambre obscure.

Dans la glace de lac, les plans de congélation se reconnaissaient sans peine par l'apparence stratifiée que la distribution des bulles d'air donne à la substance. On tailla un cube dans un morceau de glace parfaitement transparent, et l'on fit passer un faisceau de rayons solaires à travers ce cube successivement dans trois directions rectangulaires. L'une était perpendiculaire, et les deux autres parallèles aux plans de congélation. Les bulles brillantes apparurent dans tous les cas.

Lorsqu'on examinait à la loupe les surfaces perpendiculaires aux plans de congélation, après l'exposition à la lumière, on les trouvait sillonnées d'une multitude innombrable de petites fissures, d'où sortaient çà et là de petites aiguilles qui, dans certains cas, donnaient aux fissures un aspect penné. Lorsque la surface examinée était parallèle aux plans de congélation, les apparences observées devenaient très-belles. En faisant tomber sous une incidence convenable la lumière venue d'une fenêtre, l'intérieur de la masse de glace traversée se montrait remplie de petites figures ayant la forme de fleurs très-régulières. Chaque fleur avait six pétales, et son centre était occupé par une petite tache qui avait plus que l'éclat métallique. Les pétales étaient manifestement formées d'eau, et partant se montraient obscures, parce que leur visibilité n'a pour raison d'être que la très-petite différence de réfrangibilité entre la glace à zéro et l'eau à la même température.

Pendant longtemps je trouvai parfaitement constant le rapport entre les plans des fleurs et les plans de congélation. Ils étaient toujours parallèles les uns aux autres. Le développement des fleurs était indépendant de la direction suivant laquelle le faisceau traversait la glace. Voilà pourquoi, quand une masse de glace transparente de forme irrégulière m'était présentée, en la faisant traverser par un faisceau lumineux, je pouvais dire, à l'instant, suivant quelle direction ou dans quel sens la congélation avait eu lieu.

En faisant entrer le faisceau par la tranche d'une plaque de glace, que l'on déplace perpendiculairement au faisceau pour forcer le rayon à traverser successivement diverses régions de la plaque, on voyait, lorsqu'on observait à la loupe la route parcourue par le rayon, que la glace, d'abord optiquement continue, était à l'instant toute parsemée de petites taches brillantes, entourées chacune des fleurs qui leur sont associées, nées et épanouies comme par enchantement.

Le maximum d'effet n'a lieu que sur une épaisseur de 2 centimètres et demi environ, à partir du point frappé d'abord par la lumière. C'est dans cet espace que s'exerce en très-grande partie l'absorption qui résout la glace en fleurs ; j'ai cependant suivi la trace du rayon sur une profondeur de près de 10 centimètres dans de gros blocs de glace.

En outre, à une certaine distance du point d'incidence, les espaces entre les fleurs deviennent de plus en plus grands, et il n'est pas rare de les voir se développer dans des plans séparés de 8 millimètres, tandis qu'on n'en voit pas du tout dans l'intervalle qui sépare les plans. Les morceaux de glace soumis à l'expérience paraissaient tout à fait homogènes, et leur transparence semblait vraiment parfaite. Pourquoi donc la substance cède-t-elle sur certains points particuliers. Étaient-ce des points de faible structure cristalline, ou la facilité avec laquelle elle cède dépend-elle de la manière dont les ondes calorifiques heurtent les molécules de glace en ces points? Que l'on puisse ou non répondre à ces questions et à beaucoup d'autres, ces expériences n'en ont pas moins une grande importance relativement à la question principale de l'absorption. Dans la glace, l'absorption qui produit les fleurs agit par accès ou par saut, et non d'une manière continue; et il n'existe aucune raison de supposer qu'il n'en soit pas de même à l'intérieur des autres corps solides, quoique leur constitution soit telle que la discontinuité d'action ne puisse pas s'y manifester [1].

J'ai donné le nom de *bulles* aux petits disques qui brillent au milieu des fleurs, simplement à cause de leur ressemblance avec les petits globules d'air engagés dans la glace ; mais c'était uniquement à l'expérience à décider s'ils contiennent ou non de l'air.

On prépara donc des morceaux de glace à travers lesquels on fit passer un faisceau de rayons solaires, de manière à développer des fleurs en quantités et de dimensions assez grandes. Ces morceaux furent alors plongés dans de l'eau chaude au sein d'un vase de verre, et lorsque la fusion atteignit les taches brillantes, on observa soigneusement à la loupe l'effet qui allait se produire. *Au moment où l'eau vint à établir la communication entre elles et l'atmosphère, les bulles s'affaissèrent subitement, et aucune trace d'air ne monta à la surface de l'eau chaude.*

[1] Quoique la diathermancie du sel gemme soit vraiment extrême, M. Knoblauch n'en est pas moins parvenu à démontrer que lorsque les plaques sont assez épaisses, l'absorption exercée par elles est réellement élective. Cette élection ne pourrait-elle pas être attribuée à la discontinuité dont il vient d'être question?

C'est le résultat auquel il fallait s'attendre. En effet, le volume de l'eau à zéro étant moindre que celui de la glace à la même température, l'apparition de chaque fleur doit être accompagnée de la formation d'un vide, qui disparaît, comme on l'a vu, quand la glace qui l'entoure vient à se fondre.

Des expériences semblables ont été faites avec de la glace dans laquelle de véritables bulles d'air se trouvaient emprisonnées. Lorsque la fusion mettait l'air en liberté, les bulles s'élevaient doucement à travers le liquide, et flottaient pendant quelque temps à sa surface.

Une exposition d'une seconde, et même moins, à l'action du soleil, suffisait à développer les fleurs sur la glace. La première apparition de l'étoile lumineuse centrale était souvent accompagnée d'un petit craquement sensible, comme si la glace se rompait subitement.

Les extrémités des pétales avaient d'abord une courbure continue ; mais quand on laissait l'action se continuer, et quelquefois même sans cela, lorsque le soleil était ardent, les bords se montraient dentelés, ce qui ajoutait beaucoup à la beauté du phénomène.

Quelquefois un certain nombre de fleurs élémentaires se réunissaient ensemble pour former un groupe très-riche en feuilles, et ressemblant à une rose. Çà et là on pouvait observer parmi les fleurs un hexagone liquide, mais cette particularité est relativement rare.

La dissection cristalline, si je puis me servir de cette expression, réalisée par le faisceau de rayons solaires, est évidemment en rapport avec la manière dont les forces cristallines ont disposé les molécules. La soustraction de la chaleur avait rendu ces molécules aptes à se grouper, en cédant à leurs actions mutuelles ; la restitution de la chaleur enlève à ce petit édifice sa raison d'existence. Mais évidemment la parfaite symétrie des fleurs, symétrie qui n'est jamais troublée, accuse une symétrie semblable dans l'architecture moléculaire ; et voilà comment, puisque les phénomènes optiques sont sous la dépendance des arrangements moléculaires, nous pouvons conclure avec une certitude entière, des expériences précédentes, que la glace est, comme sir David Brewster l'a démontré depuis longtemps, un cristal uniaxe, au point de vue optique, l'axe unique étant perpendiculaire aux plans de congélation.

§ II

Le 25 septembre, tandis que j'examinais un morceau de glace de Norwége, parfaitement transparent, qui n'avait pas été traversé par le

faisceau condensé de lumière solaire, je trouvai l'intérieur de la masse remplie de disques liquides parallèles, dont le diamètre variait entre 0,2 et 0,02 millimètres. Ces disques étaient si minces que, vus par leur tranche, ils se réduisaient à des lignes très-fines. Ils avaient exactement l'apparence des taches circulaires d'écume huileuse, qui flottent à la surface d'un bouillon de mouton, et dans les morceaux de glace examinés d'abord, on les voyait toujours situés dans les plans de congélation.

Avec le temps, cette désagrégation interne de la glace paraissait devenir plus prononcée, de telle sorte que quelques morceaux de glace de Norwége, examinés vers le milieu de novembre, semblaient réduits à n'être plus qu'un amas de cellules d'eau engagées dans un squelette de glace. Cette discontinuité devenait sensible à la main par la facilité avec laquelle la glace désagrégée se laissait scier.

On dirait vraiment qu'il n'y a dans la nature rien d'absolument homogène. L'hétérogénéité apparaît d'abord dans des centres déterminés au lieu d'être distribuée d'une manière uniforme et continue; et dans la substance en apparence la plus homogène, nous découvririons des défauts, si nos moyens d'observation étaient assez puissants. Les observations qui précèdent font voir que certaines portions d'une masse de glace fondent plus facilement que d'autres. La température de la fusion est zéro, mais l'absence d'homogénéité parfaite, par suite d'une différence de contexture cristalline, ou de toute autre cause, fait osciller ce point de la fusion entre des limites très-rapprochées, au-dessus ou au-dessous de zéro. Soit t cette limite, exprimée en fractions de degré. Quelques portions du bloc de glace fondront à la température $-t$, tandis que d'autres exigeront la température $+t$; et par suite dans un bloc à zéro, certaines portions seront liquides et d'autres solides.

Lorsqu'on faisait passer un faisceau concentré de lumière à travers la masse de glace parsemée de disques d'eau, les fleurs à six pétales, dont il a été question plus haut, apparaissaient toujours dans les plans des disques.

. . . .

§ III

Ce que nous venons de dire nous prépare à l'étude d'une classe des phénomènes d'un grand intérêt physique. Les plus gros blocs de

glace que j'ai examinés présentaient des couches dans lesquelles les bulles d'air s'étaient rassemblées en quantité plus qu'ordinaire, et qui marquaient sans doute les limites des actes successifs de la congélation. Ces bulles étaient ordinairement allongées. Entre deux de ces lits de bulles se trouvait une couche de glace limpide, et chaque bloc se terminait par une surface de glace limpide aussi, mais qu'on jugeait, d'après son apparence, avoir plus souffert que le reste de la glace de l'action des influences extérieures.

Dans cette portion superficielle, j'ai observé des bulles d'air détachées, irrégulièrement distribuées, et, associée à chaque bulle d'air, une vésicule d'eau faisant au sein du solide l'effet d'une goutte d'huile. La figure ci-jointe donnera une idée de ces cavités composées : le cercle qui n'est pas ombré représente la bulle d'air ; l'espace ombré, la vésicule d'eau.

Lorsque la quantité d'eau était suffisamment grande, ce qui était le cas ordinaire, si l'on tournait la glace, la bulle d'air se déplaçait, et toujours pour monter au sommet de la vésicule d'eau. Quelquefois, cependant, la cellule était très-plate, et l'air était alors entièrement entouré de liquide. Ces cellules composées se rencontraient souvent dans de la glace très-limpide, qui ne donnait intérieurement aucun autre signe de désagrégation.

C'est évidemment le phénomène qui frappa si fortement M. Agassiz dans ses anciennes recherches sur le glacier de l'Aar. Les mêmes apparences ont été décrites par MM. Schlagintweit; et dans un article, récemment inséré au *Philosophical Magazine*, M. Huxley recommandait ces particularités à l'attention des physiciens [1].

La seule explication de ce phénomène donnée jusqu'ici, et adoptée il paraît sans hésitation, est celle de MM. Agassiz et Schlagintweit. Ces observateurs attribuent le phénomène à la diathermancie de la glace, qui permet à la chaleur rayonnante de passer à travers sa substance, d'élever la température des bulles d'air et de les amener à fondre la glace environnante [2].

[1] Octobre 1857.

[2] Il est évident pour quiconque a suivi le progrès de la physique moderne, que ce phénomène est dû uniquement à la diathermanéité de la glace. (Agassiz, *Système*, p. 157.)

Das Wasser ist dadurch enstanden dass die Luft Wärmestrahlen absor-

L'apparente simplicité de cette explication a sans doute contribué à la faire accepter généralement ; il suffira cependant, il me semble, d'un peu de réflexion pour voir que cette hypothèse, toute simple qu'elle puisse paraître, entraine de graves difficultés.

Pour me faire mieux comprendre, je rappellerai ce fait très-intéressant, observé d'abord par M. Agassiz, et ensuite par MM. Schlagintweit. Dans son « *Système glaciaire* », M. Agassiz le décrit en ces termes : « Je dois encore mentionner une propriété singulière de ces bulles d'air, qui d'abord nous a fortement frappé, mais qui depuis a reçu une explication très-satisfaisante. Quant un fragment contenant des bulles d'air est exposé à l'action du soleil, les bulles augmentent insensiblement. Bientôt, à mesure qu'elles grandissent, une goutte transparente se montre en un point de la bulle. Cette goutte, en augmentant de volume, contribue pour sa part à l'agrandissement de la cavité, et, en augmentant encore, elle finit par prédominer sur la bulle d'air. Celle-ci nage alors au milieu d'une zone d'eau, et tend incessamment à atteindre le point le plus élevé, du moins si l'aplatissement de la cavité ne l'en empêche pas. »

L'explication satisfaisante, dont il est parlé ici, est celle qu'on a déjà mentionnée; essayons maintenant de suivre dans ses conséquences l'hypothèse sur laquelle elle repose.

Si l'on compare des poids égaux des deux substances, la chaleur spécifique de l'eau étant 1, celle de l'air est 0,25. D'où il suit que, pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'eau, un kilogramme d'air devrait perdre 4 degrés.

Comparons ensuite des volumes égaux des deux substances. Le poids spécifique de l'eau étant 1, celui de l'air est $\frac{1}{770}$; le volume d'un kilogramme d'air est donc égal à 770 fois le volume d'un kilogramme d'eau ; d'où il suit que pour qu'une certaine quantité d'air élève d'un degré *son propre volume* d'eau, cet air doit voir sa température s'abaisser de 770 × 4, ou 3 080 degrés.

Maintenant, la chaleur latente de l'eau est 78 degrés C. ; d'où il suit que la quantité de chaleur requise pour fondre un certain poids de glace est 78 fois la quantité requise pour élever d'un degré la température du même poids d'eau ; donc, une quantité d'air, pour amener son volume de glace à l'état liquide, devrait perdre 3 080 × 78 ou 240 200 degrés de température.

birte, welche das Eis als diathermaner Körper durchliess (Schlagintweit, *Untersuchungen*, S. 17.)

Ces nombres nous donnent une idée de la somme de chaleur qui, dans l'hypothèse admise, devrait être absorbée par la bulle et communiquée à la glace pendant le temps employé à fondre un volume de celle-ci égal à celui de la bulle ; temps que nous avons vu être très-court. Ils nous montrent que la quantité de chaleur qu'on suppose être absorbée par l'air, si elle n'était pas communiquée à la glace, serait suffisante à porter la bulle d'air à une température 150 fois plus élevée que celle du point de fusion de la fonte de fer. Si l'air avait cette puissance d'absorption, il en résulterait de graves inconvénients pour les habitants de la terre, car nous habiterions au fond d'un océan atmosphérique, dont les couches supérieures arrêteraient complétement toute radiation calorifique.

Il est établi par les expériences de Delaroche et de Melloni [1], qu'un faisceau calorifique, à sa sortie du milieu qu'il a traversé sur une certaine longueur, possède à un degré très-élevé le pouvoir de passer sans nouvelle perte à travers une épaisseur additionnelle de la même substance. L'absorption a lieu, pour la plus grande partie, dans la portion du milieu traversée la première par les rayons. Dans le cas d'une plaque de verre, par exemple, 17 $\frac{1}{2}$ pour 100 de la chaleur provenant d'une lampe, sont absorbés dans le premier cinquième de millimètre ; tandis que, quand les rayons ont passé à travers 6 millimètres de la substance, une épaisseur additionnelle de 2 millimètres absorbe moins de 2 pour 100 des rayons une première fois transmis. En supposant que les rayons ont déjà traversé une plaque de 2,6 millimètres, il n'est pas douteux que la chaleur émergente puisse passer à travers une seconde couche de verre épaisse d'un millimètre, sans souffrir d'absorption sensible. A bien plus forte raison, la quantité de chaleur solaire absorbée par une bulle d'air à la surface de la terre, après que les rayons ont traversé toute l'épaisseur de notre atmosphère et ont été tamisés par elle, doit être tout à fait inappréciable.

Ce sont bien là, si je ne me trompe, les propriétés de la chaleur rayonnante révélées par les physiciens modernes ; et elles prouvent, il me semble, jusqu'à l'évidence, que l'hypothèse de MM. Agassiz et Schlagintweit a été acceptée, sans qu'on ait eu assez égard aux conséquences inadmissibles qui en découlent.

. . . .

[1] *La Thermochrose*, p. 202.

§ IV

Mais cette question reste entière : comment les chambres d'eau sont-elles produites au sein de la glace?... Une simple épreuve suffira, je pense, à décider si le liquide est ou n'est pas le produit de la glace fondue. S'il l'est, son volume doit être moindre que celui de la glace qui l'a produit, et la bulle associée avec l'eau *doit être composée d'air raréfié.* Si donc, en établissant une communication liquide entre cette bulle et l'atmosphère, on observe une diminution de volume, cela indiquera que l'eau a été produite par la fusion de la glace.

Dans un bloc de glace de Norwége, contenant les bulles composées dont nous parlons, j'ai coupé un prisme, et l'ayant plongé dans de l'eau chaude au sein d'un vase de verre, j'ai attentivement observé à travers les parois du vase l'effet de la fusion sur les bulles. *Elles diminuaient invariablement de volume au moment où la glace environnante fondait*, et le globule d'air diminué s'élevait à la surface de l'eau. Je disposai ensuite les choses de telle sorte que la paroi de la cavité se fondît par-dessous, sans permettre à la bulle d'air logée en haut de s'échapper. Au moment où la fusion atteignait la cavité, la bulle d'air se contractait sur-le-champ en une sphère ayant, dans certains cas, bien moins que la centième partie de son volume primitif. Les expériences ont été répétées avec des masses de glace différentes, et toujours avec le même résultat. Je pense donc que l'on peut regarder comme certain que les cellules liquides sont le produit de la glace fondue [1].

En considérant la manière dont la glace importée dans cette contrée est protégée contre les rayons solaires, je pense que nous devons conclure que dans les échantillons examinés par moi, *la glace en contact avec les bulles a été fondue par la chaleur, conduite ou transmise à travers sa substance, sans causer de préjudice visible à sa solidité.*

Si paradoxale que puisse paraître cette assertion, je pense qu'elle ne l'est pas pas plus qu'elle ne devait l'être d'après des raisonnements *à priori*.

La chaleur d'un corps est attribuée aujourd'hui à un mouvement de ses particules. Lorsque ce mouvement a acquis une intensité suffisante pour libérer les particules d'un solide de leurs attractions mutuelles,

[1] Ceci, naturellement, se rapporte seulement à la glace de lac examinée comme il a été décrit.

le corps passe à l'état liquide. Maintenant, pour ce qui regarde la quantité de mouvement nécessaire à produire l'état de liberté qui constitue la liquidité, les particules de la surface d'une masse de glace doivent être dans des conditions très-différentes de celles de l'intérieur, influencées et gênées de tous les côtés par l'action des particules environnantes. Mais s'il existe dans la masse une cavité, les particules qui limitent cette cavité seront dans un état semblable à celui des particules de la surface; et, par suite de la cessation, de l'un des côtés, de toute action contraire, les molécules pourront être mises en liberté par une force que la masse environnante aura transmise sans préjudice de sa solidité. En admettant que la solidité est compromise ou cesse quand l'amplitude des vibrations moléculaires atteint une certaine limite, rien n'empêche les molécules qui tapissent la cavité de dépasser cette limite et de revenir à l'état fluide; tandis que l'amplitude des molécules situées entre la surface extérieure et la cavité, en raison de la dépendance où elles sont de leurs actions mutuelles et réciproques, resteront dans les limites de la solidité. Il arrivera ici ce qui arrive dans la communication du mouvement à travers une série de billes élastiques, les billes extrêmes se détachent seules, tandis que les billes intermédiaires ne se séparent pas d'une manière visible [1].

Toutefois, là où l'expérience peut se faire, nous ne devons pas nous en rapporter au raisonnement, et j'étais particulièrement désireux d'entrer en possession d'une réponse non équivoque à cette question : Une portion intérieure d'une masse de glace peut-elle être fondue par la chaleur transmise à travers la substance par voie de *conduction?* J'enveloppai d'une feuille d'étain un morceau de glace de Norwége contenant en grand nombre les disques d'eau déjà décrits, avec quelques cellules d'air et d'eau, et je le plaçai au sein d'un mélange réfrigérant de glace pilée et de sel. Peu de minutes suffirent pour convertir par congélation les disques en cercles obscurs et minces, qui, dans certains cas, semblaient formés d'anneaux concentriques, rappelant les anneaux des sections de certaines agates. Vus par la tranche, ces disques apparaissent comme des lignes presque sans épaisseur. Les vésicules d'eau furent aussi gelées, et les bulles d'air associées diminuèrent considérablement de volume. Je plaçai la masse de glace entre mon œil et la lumière d'un bec de gaz, et je l'observai à la loupe; après quelques instants, les disques et les vésicules d'eau donnèrent

[1] Cette comparaison n'a pas d'autre but que d'aider à la conception du phénomène.

des signes de rupture. Les anneaux des disques disparurent ; leur contenu sembla s'unir pour former des taches liquides plus grandes, et quelques-uns des disques revinrent finalement comme auparavant à la condition de disques limpides et transparents.

Mais on peut opposer à cette expérience, que la glace peut avoir été liquéfiée par le rayonnement de la lampe, et j'ai à décrire des expériences qui montreront la justesse de cette objection. On a donc pris dans une masse de glace de Norwége une plaque rectangulaire épaisse de 2 centimètres et demi, longue de 7,5, et large de 5 centimètres, dans laquelle des cellules d'air et d'eau associées se montraient très-distinctes. Je l'enveloppai dans une feuille d'étain et je la plaçai dans un mélange réfrigérant. Au bout d'environ dix minutes, les globules d'eau étaient complétement gelés dans l'intérieur de la masse. Je la transportai immédiatement dans une chambre obscure, où aucune chaleur rayonnante ne pouvait l'affecter, et je l'examinai de quart d'heure en quart d'heure. Les taches sombres congelées se partagèrent graduellement en petites particules d'eau, et deux heures après, les vésicules redevenaient très-visibles au centre de la plaque de glace. Lorsqu'on l'observa en dernier lieu, elle n'avait plus qu'un centimètre d'épaisseur, et les gouttes liquides se montraient droit au centre.

Un second morceau, également congelé et enveloppé de flanelle, se comporta de la même manière. Au bout d'une heure et demie, l'eau gelée qui environnait les bulles d'air revenait à l'état liquide. Il ne peut donc rester aucun doute sur la possibilité d'effectuer la liquéfaction au sein d'une masse de glace avec de la chaleur transmise par *conduction* à travers sa substance, sans la fondre.

J'ai déjà parlé de la formation des cavités liquides observées par M. Agassiz dans la glace d'un glacier exposée au soleil. Le même effet peut être produit par l'exposition à un feu ardent de charbon. Le 21 et le 22 novembre, j'ai exposé ainsi des plaques de glace du lac Wenham, limpides, et qui contenaient quelques bulles d'air disséminées. Les bulles apparurent d'abord très-nettement rondes et sans aucune trace d'eau. Bientôt, cependant, celles qui étaient près de la surface sur laquelle tombait la chaleur rayonnante, parurent entourées d'un anneau liquide, qui se dilata peu à peu, et se montra enfin dentelé sur ses bords, comme on le voit dans la figure ci-jointe. La dentelure devenait plus prononcée quand on laissait l'action se continuer [1].

[1] Les vésicules observées dans la glace de glacier présentent aussi cette

Une seconde plaque, criblée de bulles, fut tenue aussi près du feu que la main pouvait le supporter. Retirée et examinée à la loupe, elle présentait une apparence très-belle. Dans beaucoup de cas les bulles paraissaient environnées d'une série d'anneaux concentriques, et l'anneau extérieur qui enveloppait tous les autres ressemblait à un jabot plissé.

Il m'a été impossible d'obtenir ces effets en mettant la glace en contact avec une plaque de métal chauffé à la chaleur sombre [1], ou en l'exposant aux radiations d'une source de chaleur obscure. En effet, la glace, comme nous l'avons déjà constaté, est imperméable à la radiation de ces sortes de sources calorifiques [2]. Les rayons émanés d'un feu ordinaire sont aussi absorbés très-près de la surface sur laquelle ils tombent, et voilà pourquoi la liquéfaction intérieure ci-dessus décrite reste confinée dans une couche mince adhérente à cette surface.

Mais en outre de la liquéfaction et des bulles qui lui sont associées, les fleurs, déjà décrites comme naissant de l'action des rayons solaires, arrivent par centaines à l'existence, lorsqu'une plaque de glace transparente est exposée à un feu ardent de charbon. Elles sont, toutefois, confinées aussi dans une couche très-voisine de la surface d'incidence. Dans les expériences ainsi faites, les étoiles centrales des fleurs sont souvent bordées de lignes ondulées très-belles.

Les considérations qui précèdent montrent que la liquéfaction commence à la surface d'une masse de glace à une température plus basse que celle qui est nécessaire à la liquéfaction de l'intérieur. A la surface, la température zéro détermine une vibration, qui ne pourrait être produite à l'intérieur de la glace que par une température x; l'augment x étant la température qu'il faut ajouter pour vaincre la résistance à la liquéfaction, résistance due à l'action des molécules les unes sur les autres.

forme; voyez fig. 8, pl. 6, de l'Atlas du *Système glaciaire.* Dans la fig. 13 nous retrouvons aussi l'apparence exacte des figures en forme de fleurs produites par l'action de la chaleur rayonnante sur la glace de lac.

[1] Pour développer les cavités d'eau dans la glace il faut un temps considérable; plus de temps, en effet, qu'il n'en aurait fallu pour fondre les morceaux entiers de glace employés dans ces expériences de *contact*.

[2] De là la pureté de la glace sur les moraines; les rayons du soleil sont convertis par les débris superposés en chaleur obscure, qui n'affecte qu'une couche d'une épaisseur infiniment mince, et ne peut plus comme le font les rayons du soleil produire la désagrégation de la glace plus profondément située

Supposons maintenant que nous mettions en contact deux morceaux de glace mouillés à leur surface; *nous transportons ainsi virtuellement les parties de ces morceaux qui se touchent de la surface à l'intérieur,* où x est la température de la fusion. La liquéfaction cessera donc pour les surfaces de contact. Avant de se toucher, ces surfaces participaient au mouvement qui détermine la liquéfaction, tandis que l'intérieur de la glace restait en dehors de ce mouvement ; et comme l'équilibre s'établit bientôt entre les masses situées à droite et à gauche de la couche liquide et cette couche liquide, cette couche à son tour reviendra à l'état de mouvement incompatible avec la liquidité : c'est-à-dire, en d'autres termes, *qu'il y aura congélation de la couche liquide, et que la couche congelée soudera ensemble les deux surfaces de glace entre lesquelles elle est renfermée* [1].

Si je suis dans le vrai, l'importance des principes physiques établis par moi n'échappera à personne. Si je me suis trompé, j'espère m'être exprimé de manière à rendre facile la découverte de mon erreur. Vraie ou fausse, j'ai tenu à formuler mon opinion de la manière la plus explicite possible.

§ V

Les expériences de M. Faraday sur la réunion par congélation de deux morceaux de glace à zéro, et toutes celles qui ont été décrites dans les mémoires publiés par M. Huxley et par moi, trouvent leur explication dans les principes ci-dessus exposés. La conversion de la neige en névé, et celle du névé en glacier, sont peut-être la démonstration, sur la plus grande échelle imaginable, de ces mêmes principes.

On m'a, néanmoins, fait remarquer que le soudage de deux morceaux de glace pouvait être un acte de cohésion, semblable à celui qui fait adhérer l'un à l'autre deux plaques de verre mouillées, et d'autres corps semblables. Cela n'est pas. Les deux morceaux de glace ne peuvent pas glisser l'un sur l'autre. Lorsque le contact est rompu, c'est avec le craquement propre à la rupture d'un solide. Le verre et la

[1] On suppose ici implicitement que le contact des surfaces mouillées est parfait, ou, en d'autres termes, que la couche liquide qui les sépare est si mince, qu'elle ne s'oppose nullement aux actions réciproques des molécules. Du fait même de la congélation on est en droit de conclure qu'en effet la couche liquide est presque sans épaisseur. Une couche épaissie d'eau dans la glace faciliterait la liquéfaction au lieu de la retarder.

glace ne peuvent pas être collés ensemble de cette manière, ni le verre avec le verre, ni l'alun avec l'alun, ni le nitre avec le nitre, aux températures ordinaires. De plus, j'ai mis en contact le soir des morceaux de glace, que je retrouvais le lendemain si solidement gelés ensemble, que quand je cherchais à les séparer, la nouvelle surface de séparation se produisait dans l'un des deux morceaux plutôt que de se confondre avec la surface de régélation. Quelques personnes très-sagaces m'ont encore objecté que la glace importée de la Norwége et du lac Wenham pouvait retenir un excès de froid suffisant pour solidifier une couche mince d'eau enfermée entre deux morceaux de cette glace. Mais les faits déjà rapportés sont une réponse suffisante à cette objection. La glace sur laquelle on a fait l'expérience ne peut pas être regardée comme un magasin de froid, *puisque des molécules d'eau liquide existent dans son intérieur.*

LEÇON X

(27 MARS, 1862)

Absorption de la chaleur par les substances gazeuses. — Appareil employé. — Premières difficultés. — Diathermancie de l'air et des gaz simples, transparents. — Athermancie (opacité) du gaz oléfiant et des gaz composés. — Absorption de la chaleur rayonnante par les vapeurs. — Radiation de la chaleur par les gaz. — Réciprocité de la radiation et de l'absorption. — Influence de la constitution moléculaire sur le passage de la chaleur rayonnante.

Dans notre dernière leçon, nous avons examiné la diathermancie, ou la transparence pour la chaleur, des corps solides et liquides, et nous avons vu que quelque serrés que soient les atomes de ces corps, les espaces intermédiaires entre ces atomes laissent dans beaucoup de cas jeu et passage libre aux ondulations de l'éther, qui sont alors transmises à travers les atomes sans obstacle et sans perte sensible. Dans d'autres cas, cependant, nous avons constaté que les molécules de ces corps arrêtaient les ondes de chaleur qui venaient se heurter contre elles, et que, dans cette réaction, elles devenaient à leur tour des centres d'oscillation. Nous avons appris ainsi que tandis que les corps parfaitement diathermanes se laissent traverser par les ondes de chaleur sans éprouver de changement de température, les corps qui arrêtent le flux calorifique deviennent chauds par absorption. Nous avons fait passer un faisceau calorifique puissant à travers la glace elle-même ; mais comme le faisceau était de qualité telle qu'il n'est pas intercepté par la glace, il passait à travers cette substance éminemment sensible sans la fondre.

Nous avons maintenant à nous occuper des corps gazeux, et ici les espaces intra-atomiques sont augmentés dans une proportion si grande, les molécules sont si complétement dégagées de toute attraction mutuelle, que nous serions presque tenté d'en conclure que les gaz et les vapeurs offrent une porte parfaitement ouverte au passage des ondes calorifiques. C'était, en effet, la croyance universelle jusqu'à une époque toute récente, et cette opinion semblait justifiée par des expériences faites sur l'air atmosphérique, expériences dont le résultat apparent était que l'air ne présentait pas de traces sensibles d'absorption.

Mais chaque nouvelle année accroît successivement nos moyens d'expérience; nos prédécesseurs en étaient souvent réduits à combattre avec des flèches à pointes de silex, tandis que, si nous pouvons nous exprimer ainsi, nous avons à notre service de puissantes épées. Voilà pourquoi leur conflit avec la nature n'est pas définitivement clos par leur défaite. Mettons donc une fois encore à l'épreuve la diathermancie de l'air atmosphérique. Nous pouvons procéder de la manière suivante à une sorte d'essai préliminaire. AB est un cylindre creux en fer-blanc (fig. 89), de

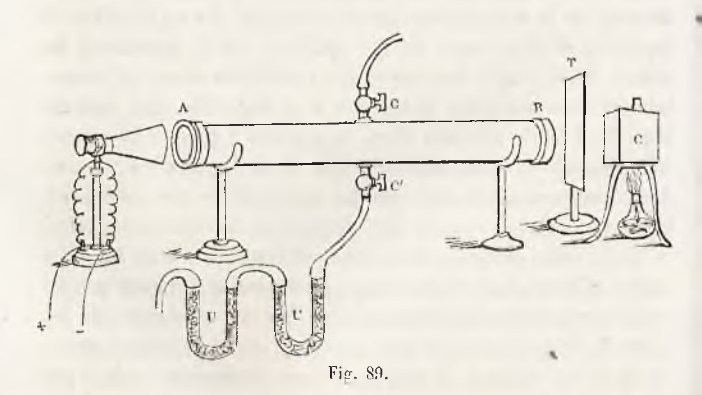


Fig. 89.

1 mètre 20 de longueur, de 7,5 centimètres de diamètre, à travers lequel nous pouvons faire passer nos faisceaux de chaleur. Mais il faut que nous soyons en état de comparer le passage des

rayons à travers l'air, avec leur passage à travers le vide, et que, par conséquent, nous soyons en possession de quelque moyen de fermer les extrémités de notre cylindre pour pouvoir y faire le vide. C'est la première difficulté expérimentale que nous rencontrons sur notre chemin. En règle générale, la chaleur obscure est plus avidement absorbée que la chaleur lumineuse, et, parce que notre but est de rendre sensible le pouvoir absorbant d'un corps éminemment diathermane, la chaleur que nous devrons mettre en jeu sera vraisemblablement la chaleur obscure.

Notre tube doit donc être bouché avec une substance qui laisse le passage libre à cette sorte de chaleur. Pour cela, recourrons-nous au verre? Un coup d'œil jeté sur la table à la page 290 nous montrerait que pour de semblables rayons, des plaques de verre sont parfaitement opaques; autant vaudrait boucher notre tube avec des plaques de métal. Voyez combien les résultats obtenus par les expérimentateurs qui ont précédé servent au profit de leurs successeurs. Une expérience en fait naître une autre, et la science grandit par l'appropriation de plus en plus grande des moyens à la fin. Si Melloni n'avait pas découvert les propriétés diathermanes du sel gemme, nous serions pris tout à fait au dépourvu. Cette découverte, cependant, n'a pas empêché que j'aie été arrêté pendant quelque temps par la difficulté de me procurer des plaques de sel gemme suffisamment grandes et pures, qui servissent de bouchon ou d'obturateur à mes tubes. Mais le manœuvre de la science n'a pas longtemps à attendre le secours qu'il implore; et, grâce aux amis qui me sont venus en aide, je suis entré en possession de deux plaques de cette précieuse substance que je puis, par l'intermédiaire de ces viroles, visser sur les orifices de mon cylindre [1]. Vous remarquez ces

[1] Dans un moment où j'avais grand besoin d'une provision de sel gemme, j'exposai ma position dans le « Philosophical Magazine, et sir John Herschel répondit immédiatement à mon appel, en m'envoyant un bloc de sel, accompagné d'une note dont je publie ici un extrait, parce qu'elle rappelle la destination primitive de ce bloc de sel. Il ne m'a pas encore été donné de pouvoir soumettre à l'examen le point très-important sur lequel l'éminent écrivain daignait appeler mon attention. Je suis auss

deux robinets fixés au cylindre; l'un, *c*, communique avec une machine pneumatique, au moyen de laquelle je puis faire le vide dans le tube; l'autre, *c'*, servira à faire entrer l'air ou un autre gaz dans le tube.

A une extrémité du cylindre, je place le cube C de Leslie, qui contient de l'eau bouillante, et que j'ai recouvert de noir de fumée, pour accroître son pouvoir rayonnant. A l'autre bout du cylindre se trouve notre pile thermo-électrique, dont les fils aboutissent au galvanomètre. Entre l'extrémité du cylindre et la source de chaleur, j'ai dressé un écran en fer-blanc, T, qui, quand on le retire, laisse les rayons calorifiques arriver à la pile à travers le tube. Nous faisons d'abord le vide dans le cylindre,

grandement redevable au Dr Szabo, commissaire hongrois, à l'Exposition internationale, de mon opulence relative actuelle, de la belle provision de sel gemme que je tiens de sa bienveillance. Je dois enfin mes remerciements les plus sincères à MM. Fletcher de Nortwich et à M. Corbett de Bromsgrove, pour leur grande obligeance à mon égard.

Voici l'extrait de la note de sir J. Herschell : « Après la publication de mon mémoire dans les *Phil. trans.* de 1840, j'étais très-désireux de me soustraire à l'influence des prismes et des lentilles de verre, et d'arriver à savoir avec certitude, dans le cas où cela serait possible, si le groupe de taches $\delta\gamma\delta\varepsilon$ isolé par moi dans le spectre, était d'origine solaire ou terrestre. Le sel gemme était ma ressource naturelle, et après beaucoup d'efforts infructueux pour arriver à posséder un échantillon suffisamment grand et pur, je reçus enfin de feu le docteur Sommerville (c'est du moins ce que m'a appris un de mes amis du Cheshire) le très-beau bloc que je mets aujourd'hui à votre disposition. Il est, il est vrai, bien fendillé, mais je ne doute pas qu'on ne puisse en tirer des morceaux assez grands pour en faire des prismes et des lentilles, au moins en soudant ensemble plusieurs plaques.

« Mais je n'avais pas ce qu'il fallait pour ce travail, évidemment délicat et difficile (je me proposais de dissoudre les angles et de le ramener à la forme voulue en le léchant et le polissant) et quoique je n'aie jamais perdu de vue mon projet, je n'ai pu encore en rien tirer; aussi l'avais-je mis de côté. En le revoyant un ou deux ans après, je fus épouvanté de trouver qu'il avait beaucoup perdu par déliquescence. En conséquence, je le plaçai sur un plat en terre, je l'entourai de sel, je recouvrai le tout d'une enveloppe en fer et le déposai sur une tablette élevée, dans une chambre chauffée par une étuve d'Arnott, où il est resté depuis lors.

« Si vous pouvez en tirer parti, je vous prie de répéter mon expérience si cela est possible, telle que je l'ai décrite, et de résoudre une question qui m'a toujours frappé par sa grande importance. »

nous écartons un peu l'écran, les rayons traversent le vide et tombent sur la pile. L'écran de fer-blanc, vous le voyez, est retiré seulement en partie, et la déviation fixe produite par la chaleur transmise est actuellement de 30 degrés.

Faisons maintenant entrer de l'air sec : je le puis au moyen du robinet c', d'où part un tube flexible conduisant aux tubes recourbés V, V', dont je vais expliquer le rôle : V est rempli de fragments de pierre ponce humectés avec une solution de potasse caustique, il est destiné à absorber tout l'acide carbonique qui peut être contenu dans l'air; V' est un tube semblable, rempli de fragments de pierre ponce humectée avec de l'acide sulfurique, pour absorber la vapeur aqueuse de l'air. Ainsi l'air arrive au cylindre privé à la fois de sa vapeur aqueuse et de son acide carbonique. Il entre maintenant, l'éprouvette de la machine l'indique, et, à mesure qu'il entre, je vous invite à observer l'aiguille. Si l'entrée de l'air diminue la radiation à travers le cylindre, si l'air est une substance capable d'éteindre les ondes de l'éther d'une manière sensible, on le verra à la diminution de la déviation du galvanomètre. Le tube est maintenant rempli d'air; mais vous ne voyez pas de changement dans la position de l'aiguille; et vous n'en verriez pas même si vous étiez tout près de l'instrument. L'air ainsi examiné semble aussi transparent pour la chaleur rayonnante que le vide lui-même.

En déplaçant l'écran, je puis faire varier la quantité de chaleur qui tombe sur la pile. Vous voyez, en effet, qu'en l'écartant, je puis faire arrêter l'aiguille à 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, successivement; et, tandis qu'elle occupe chacune de ces positions, je pourrais répéter l'expérience que je viens de faire devant vous. Dans aucun cas, vous ne pourriez reconnaître le plus léger mouvement dans l'aiguille. Il en serait de même si je ramenais l'écran de manière à réduire la déviation à 20 et à 10 degrés.

L'expérience qui vient d'être faite est une question adressée à la nature, et son silence pourrait être pris pour une réponse négative. Mais un physicien ne doit pas accepter à la légère une réponse négative, et je ne suis pas sûr que nous ayons adressé la question dans les meilleurs termes possibles. Analysons ce que

nous avons fait, et considérons d'abord le cas de notre plus petite déviation de 10 degrés. En supposant que l'air ne soit pas parfaitement diathermane, qu'il intercepte réellement une petite partie, par exemple, la millième partie de la chaleur qui passe par le tube, que sur mille rayons, il y en a un de détruit; serions-nous en mesure de le découvrir? Cette absorption, si elle avait lieu, devrait abaisser la déviation de la millième partie de 10 degrés, de la centième partie d'un degré, diminution qu'il vous serait impossible de voir, quand même vous seriez tout près du galvanomètre [1]. Dans ces conditions, *la quantité totale de chaleur qui tombe sur la pile est si peu considérable, qu'alors même qu'une petite fraction en serait absorbée, on ne pourrait pas le découvrir.*

Mais nous ne nous sommes pas bornés à une petite quantité de chaleur; le résultat a été le même quand la déviation était de 80° que quand elle était de 10°. Ici je dois vous demander de redoubler d'attention, parce que nous allons marcher ensemble pour un instant sur un terrain difficile. J'ai besoin de rendre clairement intelligible pour vous une particularité importante du galvanomètre.

L'aiguille étant à zéro, supposez qu'il tombe sur la pile une quantité de chaleur suffisante pour produire une déviation d'un degré. Supposez que j'augmente ensuite la quantité de chaleur, au point de produire des déviations de 2 degrés, 3 degrés, 4 degrés, 5 degrés; je sais qu'alors les quantités de chaleur qui produisent ces déviations sont entre elles dans les rapports de 1 : 2 : 3 : 4 : 5; la quantité de chaleur qui produit une déviation de 5° étant exactement cinq fois celle qui produit une déviation de 1°. Mais cette proportionnalité n'existe qu'aussi longtemps que les déviations n'excèdent pas une certaine grandeur. Car à mesure que l'aiguille s'éloigne de zéro, le courant agit sur elle avec un désavantage croissant. Voyez ce que fait le matelot travaillant à un cabestan. Il exerce toujours son effort perpendi-

[1] On comprendra que je parle ici de degrés *galvanométriques*, et non de degrés *thermométriques*.

culairement au bras du levier, car s'il l'appliquait obliquement, une partie seulement de sa force serait employée utilement à faire tourner le cabestan. Or, dans le cas de notre courant électrique, quand l'aiguille est très-oblique à la direction du courant, une portion seulement de sa force sert efficacement à faire avancer l'aiguille. Il arrive ainsi que, quoique la quantité de chaleur puisse être, et, dans le cas actuel *soit* exactement exprimée par la force du courant qu'elle fait naître, cependant des déviations plus grandes, par cela même qu'elles n'indiquent pas l'action totale du courant, mais seulement une partie de cette action, ne peuvent pas être une mesure fidèle de la quantité de chaleur reçue par la pile.

Le galvanomètre qui est maintenant devant vous a été construit de telle sorte que les angles de déviation, jusqu'à 30° ou à peu près, soient proportionnels aux quantités de chaleur ; la quantité de chaleur nécessaire pour faire avancer l'aiguille de 29° à 30° est à peu près la même que celle qui serait requise pour la faire avancer de 0° à 1°. Mais au-dessus de 30° la proportionnalité cesse. La quantité de chaleur requise pour déplacer l'aiguille de 40° à 41° est trois fois celle nécessaire pour la déplacer de 0° à 1°; pour la porter de 50° à 51° il faudrait cinq fois la chaleur nécessaire pour la porter de 0° à 1°; pour l'amener de 60° à 61° il faudrait environ dix fois la chaleur nécessaire pour l'amener de 0° à 1°; pour la faire dévier de 70° à 71° il faudrait près de vingt fois, enfin pour la mouvoir de 80° à 81° il faudrait plus de cinquante fois la chaleur nécessaire pour la mener de 0° à 1°. Ainsi, plus nous montons, plus est grande la quantité de chaleur représentée par un degré de déviation; la raison en est que la force qui meut l'aiguille n'est qu'une fraction de la force réelle qui circule dans le fil, et ne représente par conséquent, qu'une fraction de la chaleur reçue par la pile.

Par certains procédés que je ne veux pas m'arrêter à décrire ici[1], je pourrais exprimer les degrés supérieurs, en termes semblables à ceux par lesquels s'expriment les degrés inférieurs; j'ap-

[1] Voyez l'Appendice à la leçon X.

prendrais ainsi que tandis que les déviations de 10°, 20°, 30°, représentent des quantités de chaleur exprimées respectivement par les nombres 10, 20, 30, une déviation de 40° représenterait une quantité de chaleur exprimée par le nombre 47; une déviation de 50° une quantité de chaleur exprimée par le nombre 80; qu'enfin les déviations 60°, 70°, 80°, représentent des quantités de chaleur qui croissent dans une proportion beaucoup plus rapide que les déviations elles-mêmes.

A quoi aboutira cette analyse? Elle nous conduira, je l'espère, à une meilleure méthode d'interroger la nature. Elle nous fera faire cette réflexion que, quand nous faisons nos angles petits, la quantité de chaleur qui tombe sur la pile est si peu considérable, que si même une fraction de cette chaleur était absorbée, elle échapperait à notre observation; tandis que, si nous faisions nos déviations plus grandes, en employant un puissant flux de chaleur, l'aiguille atteindrait une position dont on ne pourrait l'arracher que par une addition ou une soustraction considérable. La millième partie de la radiation totale dans le premier cas était trop petite, absolument, pour être mesurée; dans le second cas, cette même millième partie, pourrait être quelque chose de considérable, sans pouvoir toutefois imprimer à l'aiguille un mouvement sensible. Quand, par exemple, la déviation est de 80°, une augmentation ou une diminution de chaleur équivalente à 15 ou 20 des degrés inférieurs du galvanomètre, serait à peine mesurable.

Nous voici maintenant face à face avec notre problème; il s'agit d'avoir un flux de chaleur assez grand pour qu'une minime fraction de cette chaleur ne soit pas un infiniment petit et puisse maintenir encore notre aiguille dans la position où elle est le plus sensible à l'action du courant. Si nous pouvons y parvenir, nous augmenterons indéfiniment notre puissance d'expérimentation. Or, lorsqu'une fraction de la chaleur, si petite qu'elle soit, est interceptée par le gaz, *nous pouvons augmenter la valeur absolue de cette fraction en augmentant le tout dont elle est une fraction*.

Le problème, heureusement, admet une solution réellement

pratique. Vous savez que quand on fait tomber de la chaleur sur les deux faces opposées de la pile thermo-électrique, les courants engendrés se neutralisent plus ou moins; et que si les quantités de chaleur qui tombent sur les deux faces de la pile, sont parfaitement égales, la neutralisation est complète. L'aiguille de notre galvanomètre est maintenant déviée à 80° par le flux de chaleur qui passe à travers le tube; je découvre la seconde face de la pile, je la munis de son réflecteur conique, et je place un second cube d'eau bouillante devant cette face; l'aiguille, comme vous voyez retombe instantanément.

Au moyen d'un écran convenablement disposé je puis régler de telle sorte la quantité de chaleur qui arrive à la face postérieure de la pile, qu'elle neutralise exactement la chaleur reçue par l'autre face ; c'est ce qui est fait maintenant, et l'aiguille est revenue à zéro.

Nous avons donc ici deux flux de chaleur puissants et parfaitement égaux, tombant sur les faces opposées de la pile, et l'un de ces flux passe à travers notre cylindre vide. Si je fais entrer l'air dans le cylindre, et si cet air exerce une action appréciable sur les rayons de chaleur, l'égalité qui existe actuellement sera détruite; l'air du tube s'étant emparé d'une partie des rayons qui le traversent, la seconde source de chaleur triomphera; l'aiguille, qui est maintenant dans sa position la plus sensible à l'action du courant, sera déviée, et de la grandeur de la déviation nous pourrons déduire exactement par le calcul la grandeur de l'absorption.

J'ai ainsi esquissé, en traits généraux, l'appareil qui nous servira dans nos recherches sur la chaleur rayonnante dans ses rapports avec les substances gazeuses. Les moyens d'épreuve dont nous devons pouvoir disposer doivent être à la fois si puissants et si délicats, qu'un appareil grossier tel que je viens de le décrire ne répondrait nullement à notre dessein. Mais vous n'aurez plus de difficulté à bien saisir la construction et l'emploi de l'appareil plus parfait, avec lequel ont été réellement exécutées les expériences sur l'absorption et le rayonnement de la chaleur dans les gaz. Voyez planche I, à la fin du volume.

Entre S et S', s'étend le *tube d'expérience*, tube creux de laiton, poli à l'intérieur; S et S' sont les plaques de sel gemme qui ferment hermétiquement le cylindre; la longueur de S en S', dans les expériences que je rappellerai d'abord est de 1^{m},20. C, la source de chaleur, est un cube en cuivre affiné, rempli d'eau tenue continuellement en ébullition par la lampe L. Le cylindre court F, soudé au cube C, a le même diamètre que le tube d'expérience, et peut être mis en communication hermétique avec lui, au moyen du robinet S. Ainsi, entre la source C et l'extrémité S' du tube d'expérience, nous avons la *chambre antérieure* F, où l'on peut faire le vide, de sorte que les rayons passeront de la source dans le cylindre SS' sans être tamisés. Pour empêcher que la chaleur n'aille par conduction de la source C à la plaque en S, on fait passer la chambre F à travers le vase V, dans lequel circule continuellement un courant d'eau froide, entrant par le tuyau *i i*, qui plonge au fond du vase, et s'échappant par le tuyau d'écoulement *e e*. Le tube d'expérience et la chambre antérieure communiquent séparément avec la machine pneumatique AA, de sorte que l'un et l'autre puissent être vidés ou remplis d'air indépendamment. Je ferai remarquer que, dans les derniers arrangements, le tube d'expérience, tout à fait indépendant de la machine pneumatique, ne communiquait avec elle que par un tuyau flexible. On évitait ainsi complétement les trépidations que le jeu de la machine faisait éprouver à l'appareil quand la liaison était rigide.

P est la pile thermo-électrique, placée sur un support à l'extrémité du tube d'expérience, et munie de deux réflecteurs coniques. C'est le *cube de compensation*, destiné à neutraliser le rayonnement de C; H est l'*écran régulateur* qu'on peut faire avancer ou reculer par un mouvement excessivement lent. NN' est un galvanomètre très-sensible communiquant avec la pile P, par les fils *w*,*w'*. Le tube gradué O O (à droite de la planche), et l'appendice M K (fixé au milieu du tube d'expérience) seront décrits tout à l'heure plus en détail.

J'aurais de la peine à soutenir votre attention, si j'énumérais les difficultés qui m'assaillirent d'abord dans les recherches exé-

cutées avec cet appareil, et les précautions innombrables qu'il a fallu prendre pour établir la balance exacte entre les deux puissantes sources de chaleur auxquelles on a recours ici. Je n'exagère rien, en disant que les expériences faites avec le seul air atmosphérique se comptent par dixaines de mille. Quelquefois, pendant une semaine, et même pendant quinze jours, nous obtenions des résultats comparables et satisfaisants; les conditions rigoureuses d'une expérimentation exacte semblaient être enfin réalisées, lorsque tout à coup les essais du lendemain venaient renverser l'édifice de nos espérances, et nous obliger à recommencer nos recherches dans des conditions nouvelles. C'est là ce qui effraye l'expérimentateur; ce sont ces luttes préliminaires avec les difficultés d'un sujet obscur, incertain et ingrat, sans qu'on puisse aucunement savoir si la bataille vous mettra en possession de quelques résultats avantageux, qui font que les découvertes sont si difficiles et si rares.

Mais l'expérimentateur, et surtout le *jeune* expérimentateur, doit savoir, qu'au moins au point de vue du progrès moral, il ne peut que gagner s'il combat loyalement. Même avec un résultat négatif, la conscience qu'il est allé bravement au fond de la question, autant que ses moyens le lui permettaient, la consolation de n'avoir pas jeté le manche après la coignée, quoique ses efforts n'aient abouti qu'à lui démontrer l'inutilité de ses recherches, tout cela exerce sur son esprit une réaction salutaire, et lui donne confiance en lui-même pour les travaux à venir.

Mais revenons à notre sujet. J'ai négligé d'abord tout à fait la vapeur d'eau et l'acide carbonique de l'atmosphère, jugeant, comme d'autres l'ont fait depuis, que les quantités de ces substances sont si petites que leur influence sur la chaleur rayonnante doit être tout à fait inappréciable; après un certain temps, cependant, j'ai trouvé que cette supposition m'avait complétement égaré. Je me servis d'abord de chlorure de calcium comme agent de dessiccation, mais j'ai dû l'abandonner. J'employai plus tard de la pierre-ponce humectée d'acide sulfurique, et j'ai dû encore y renoncer. Finalement, j'eus recours simplement à des fragments de verre, mouillés d'acide sulfurique, et

introduits à l'aide d'un entonnoir dans un tube en U. J'ai trouvé que cette disposition était la meilleure, mais à la condition de prendre les plus grandes précautions. Il est nécessaire d'entasser au sommet de chaque tube une couche de fragments de verre secs, car j'ai trouvé que la plus petite particule de poussière venant du bouchon, ou une parcelle de mastic, égale à peine à la vingtième partie d'une tête d'épingle, suffisaient, si elles arrivaient jusqu'à l'acide, pour altérer les résultats. Il faut, en outre, changer souvent le tube dessiccateur, parce que les matières organiques de l'atmosphère, si minimes qu'elles fussent, ramenaient bientôt le désordre.

Pour éliminer l'acide carbonique, on réduisait du marbre pur de Carrare en fragments qu'on humectait de potasse caustique, et qu'on introduisait dans un tube en U. Ce sont les agents dont je me sers à présent pour dessécher l'air, et pour le dépouiller de son acide carbonique; mais avant de les adopter définitivement, j'ai employé, pour dessécher l'air, la disposition indiquée dans la planche I. Y,Y sont des tubes de verre, longs chacun d'un mètre, remplis de chlorure de calcium; à leur suite se plaçaient deux tubes en U, R, Z, remplis de pierre-ponce rendue humide par de l'acide sulfurique. L'air avait ainsi à passer, en premier lieu, sur 6 mètres de chlorure de calcium, puis à travers les tubes à acide sulfurique, avant d'entrer dans le tube d'expérience SS'. Un gazomètre, GG, servait à contenir les gaz autres que l'air atmosphérique. Dans les recherches où je suis engagé à présent, cette disposition, comme je l'ai dit, est abandonnée, une disposition plus simple ayant été trouvée plus efficace.

Mon aide a fait le vide et dans la chambre antérieure F et dans le tube d'expérience SS'. Les rayons partis de la source C entrent dans la chambre antérieure, traversent la plaque de sel gemme en S, le tube d'expérience, la plaque de sel gemme S', et vont ensuite frapper la surface antérieure de la pile P. Ce rayonnement est neutralisé par celui du cube compensateur C'. L'aiguille, vous le voyez, est à zéro. Nous allons commencer nos expériences, et faire subir à l'air cette redoutable épreuve. Il entre maintenant dans le tube d'expérience; mais, de la distance

où vous êtes, vous n'apercevez pas le mouvement de l'aiguille, et notre procédé d'expérimentation, en lui-même si efficace, est insuffisant à mettre en évidence aucune absorption de la part de l'air. Ses atomes, apparemment, sont impuissants à éteindre une seule onde calorifique; *il se comporte comme le vide à l'égard des rayons de chaleur.* Cependant, si vous étiez plus près, vous verriez une déviation de l'aiguille d'environ un degré. L'oxygène, l'hydrogène, l'azote, lorsqu'ils sont soigneusement purifiés, se comportent comme l'air atmosphérique; ils sont presque neutres.

On pensait que la neutralité de l'air atmosphérique s'étendait généralement aux gaz transparents. Voyons si cela est exact. Voici un gazomètre contenant du gaz oléfiant, le gaz ordinaire de la houille pourrait aussi servir au besoin. Je laisse s'échapper un peu de ce gaz oléfiant dans l'air, mais vous ne voyez rien; il est parfaitement transparent. Le tube d'expérience est vide, et l'aiguille marque zéro; nous faisons entrer le gaz oléfiant dans l'appareil. Observez l'effet. L'aiguille part à l'instant; ce gaz si transparent éteint les rayons en masse. La déviation finale et permanente, quand le tube est plein, s'élève à 70 degrés.

J'installe entre la pile P et l'extrémité S′ du tube d'expérience, un écran métallique qui intercepte totalement le rayonnement à travers le tube. La face de la pile tournée vers l'écran de métal perd rapidement sa chaleur par le rayonnement; elle est maintenant à la température de cette salle, et la radiation du tube compensateur agit seule sur la pile, en produisant une déviation de 75 degrés. Au début de l'expérience les rayonnements des deux cubes étaient égaux, et par conséquent la déviation de 75° correspond *au rayonnement total* à travers le tube d'expérience, quand celui-ci est vide.

Si l'on prend pour unité la quantité de chaleur nécessaire pour faire marcher l'aiguille de 0° à 1°, le nombre d'unités exprimé par une déviation de 75° est

560

Le nombre d'unités exprimé par une déviation de 70° est

290

Donc sur un total de 360, le gaz oléfiant a éteint 290; c'est à peu près les sept neuvièmes du tout, ou environ 81 pour 100.

Ne vous semble-t-il pas qu'une couche opaque s'est subitement précipitée sur nos plaques de sel, quand le gaz est entré? Cette substance, cependant, ne dépose pas de couche semblable. Je projette un courant de gaz sec contre une plaque polie de sel, et vous n'apercevez pas le moindre obscurcissement. En outre, les plaques de sel gemme, quoiqu'elles soient nécessaires pour des déterminations exactes, ne le sont pas pour mettre en évidence le pouvoir d'extinction de ce gaz. Voici un cylindre ouvert en fer-blanc que j'interpose entre la pile et notre source rayonnante; je laisse s'écouler tranquillement du gaz oléfiant de ce gazomètre dans le cylindre, et vous voyez l'aiguille s'enfuir vers ses arrêts. Remarquez la faible quantité de gaz que je vais mettre en jeu. Je purge le tube en y faisant passer un courant d'air; l'aiguille est maintenant à zéro; j'ouvre simplement le robinet pour le refermer aussitôt, le plus rapidement possible; une seule bulle de gaz est entrée dans le tube pendant ce court intervalle; et cependant vous voyez que sa présence fait marcher l'aiguille à 70°. J'enlève ensuite le tube, et je ne laisse que l'air libre entre la pile et la source; je fais passer du gaz oléfiant du gazomètre dans cet espace. Vous ne voyez rien dans l'air; mais le mouvement de l'aiguille qui a parcouru un arc de 6° annonce la présence de la barrière invisible opposée aux rayons calorifiques.

Il est donc démontré que les ondulations de l'éther qui glissent sans obstacle entre les atomes d'oxygène, d'azote et d'hydrogène sont puissamment absorbées par les molécules du gaz oléfiant. Nous trouverons encore d'autres gaz transparents dont la supériorité sur l'air est pour ainsi dire incommensurable. Nous pouvons limiter à volonté le nombre des atomes gazeux, et faire varier ainsi presque à volonté la proportion d'ondes éthérées détruites. Sous ce rapport les corps gazeux possèdent un grand avantage sur les liquides et les solides, dans les expériences sur la radiation. La machine pneumatique est en communication avec un tube manométrique, à l'aide duquel je puis introduire des quantités de gaz définies et mesurées. Le tube d'expérience

est maintenant vide; en faisant tourner lentement ce robinet, et observant le niveau du mercure, je fais entrer le gaz oléfiant jusqu'à ce que la colonne baisse d'un pouce. J'observe le galvanomètre et je lis la déviation. Après avoir ainsi déterminé l'absorption produite par un pouce, j'en ajoute un second, et je détermine l'absorption produite par deux pouces de gaz, etc. En procédant ainsi nous obtenons pour des tensions de 1 à 10 pouces les absorptions suivantes :

GAZ OLÉFIANT

Tensions en pouces.	Absorption.
1	90
2	123
3	142
4	157
5	168
6	177
7	182
8	186
9	190
10	193

On a pris ici pour unité la quantité de chaleur absorbée par l'air sec introduit dans le tube sous la pression *d'une atmosphère entière*. Ce tableau montre, par exemple, qu'un trentième d'atmosphère de gaz oléfiant exerce quatre-vingt-dix fois l'absorption d'une atmosphère d'air.

Le tableau nous apprend encore que chaque pouce additionnel de gaz oléfiant produit moins d'absorption que celui qui l'a précédé. Un seul pouce, au commencement, éteint 90 rayons, un second n'en éteint que 33, et l'addition d'un pouce, quand il y en a déjà neuf dans le tube, n'opère la destruction que de 3 rayons. C'est ce à quoi l'on devait raisonnablement s'attendre. Le nombre des rayons émis est limité, et leur passage à travers le premier pouce de gaz oléfiant a tellement éclairci leurs rangs que l'exécution faite par le second pouce est naturellement moindre que celle du premier. Cette exécution doit diminuer, à mesure que le nombre des rayons susceptibles d'être détruits

par le gaz devient moindre, jusqu'à ce qu'enfin, tous les rayons absorbables ayant été soustraits, ce qui reste de chaleur traverse le gaz sans obstacle.

Mais, en supposant la quantité de gaz d'abord introduite si peu considérable que le nombre de rayons éteints par elle soit une quantité sensiblement nulle, relativement au nombre total de rayons susceptibles d'être détruits, nous pouvons avec raison nous attendre à voir que, pendant quelque temps au moins, la quantité d'absorption sera proportionnelle à la quantité de gaz présent; qu'une quantité double de gaz produira un effet double, une quantité triple, un effet triple; ou, en général, que l'absorption sera, pendant un certain temps, proportionnelle à la densité.

Pour justifier ces prévisions nous aurons à faire usage d'une portion de l'appareil omise dans la description générale. OO (planche I) est un tube de verre gradué, dont l'extrémité plonge dans un bassin d'eau B. Ce tube est fermé en haut par le robinet *r*; *dd* est un tube contenant des fragments de chlorure de calcium. Le tube OO est d'abord rempli d'eau jusqu'au robinet *r*; l'eau cède ensuite doucement la place au gaz oléfiant qui vient par en bas bulle à bulle. On introduit le gaz dans le tube d'expérience par le robinet *r*, et, à mesure qu'il entre, l'eau s'élève dans le tube OO, dont chaque division représente un volume d'un 50e. On fait entrer successivement dans le tube une, deux, trois de ces mesures de gaz, et l'on détermine l'absorption dans chaque cas particulier.

Le tableau suivant donne dans la première colonne la quantité de gaz introduite dans le tube; dans la seconde, l'absorption correspondante; dans la troisième, l'absorption calculée en la supposant proportionnelle à la densité.

GAZ OLÉFIANT

Unité de mesure : un 50e de pouce cube.

Mesures de gaz.	Absorption Observée	Absorption Calculée
1	2,2 . . .	2,2
2	4,5 . . .	4.4
3	6,6 . . .	6,6
4	8.8 . . .	8,8
5	11,0 . . .	11,0
6	12,0 . . .	13,2
7	14.8 . . .	15,4
8	16,8 . . .	17,6
9	19,8 . . .	19.8
10	22.0 . . .	22,0
11	24,0 . . .	24,2
12	25.4 . . .	26,4
13	29,0 . . .	28,6
14	30,2 . . .	30,8
15	33,5 . . .	33,0

Ce tableau prouve l'exactitude de l'hypothèse admise : quand on emploie de petites quantités de gaz, l'absorption est sensiblement proportionnelle à la densité. Mais considérons un moment l'extrême ténuité du gaz avec lequel nous avons opéré. Le volume de notre tube d'expérience est de 220 pouces cubes ; imaginez-vous un 50e de pouce cube de gaz diffusé dans cet espace, et vous aurez l'atmosphère à travers laquelle les rayons calorifiques passaient dans notre première expérience. La tension de cette atmosphère n'excède pas un 11000e de celle de l'air ordinaire, elle ne ferait pas descendre de plus d'un 367e de pouce anglais la colonne de mercure qui communique avec la machine pneumatique. Cependant son action sur les rayons calorifiques est parfaitement mesurable.

Mais la force absorbante du gaz oléfiant, si extraordinaire qu'elle se montre dans les expériences précédentes, est surpassée par celle de différentes vapeurs, dont je vais maintenant essayer de vous démontrer l'action. Voici une éprouvette de verre, G (fig. 90), munie d'un capuchon en laiton, sur lequel un robinet peut être vissé hermétiquement. Je verse une petite quantité

d'éther sulfurique dans l'éprouvette, et je chasse complétement, dans le premier instant, l'air qui remplit l'éprouvette au-dessus du liquide. Je visse l'éprouvette sur le tube d'expérience, dans lequel le vide est actuellement fait, l'aiguille est à zéro, et je fais entrer la vapeur de l'éprouvette dans le tube d'expérience. Le mercure du manomètre descend, et maintenant qu'il a baissé d'un pouce, j'arrête l'introduction de la vapeur. Au moment où la vapeur est entrée, l'aiguille a marché, et maintenant elle a atteint 65°. J'ajoute un second, puis un troisième, un quatrième, etc. pouce, et à chaque fois je détermine la quantité de rayons éteints. Les absorptions produites par quatre pouces introduits de cette manière sont données dans le tableau suivant. Pour faciliter la comparaison, j'ai placé dans la troisième colonne les absorptions correspondantes du gaz oléfiant.

Fig. 90.

ÉTHER SULFURIQUE

Tension en pouces.	Absorption.	Absorption correspondante du gaz oléfiant.
1	214	90
2	282	123
3	315	142
4	330	154

Pour ces tensions, l'absorption de la chaleur rayonnante par la vapeur de l'éther sulfurique est égale à environ deux et deux tiers de fois l'absorption produite par le gaz oléfiant. En outre, il n'y a pas de proportionnalité entre la quantité de vapeur introduite et l'absorption.

Mais les réflexions que nous avons faites au sujet du gaz oléfiant s'appliquent également à l'éther. Si nous faisions notre unité de mesure assez petite, le nombre des rayons éteints serait presque nul, en comparaison du nombre total des rayons; et pendant un certain temps, nous retrouverions probablement que l'absorption est directement proportionnelle à la densité. Pour s'assurer qu'il en est ainsi, on fait usage de l'autre portion de

l'appareil omise dans la description générale. K est une des petites éprouvettes déjà décrites, avec un capuchon en laiton, étroitement vissée au robinet c'. Entre les robinets c' et c, dont le dernier est fixé au tube d'expérience, se trouve la chambre M, dont la capacité a été déterminée exactement. L'éprouvette K a été remplie en partie avec de l'éther, et l'air qui était au-dessus a été évacué. Le robinet c' étant fermé et le robinet c ouvert, on fait le vide dans le tube SS' et dans la chambre M. On ferme maintenant le robinet c, on ouvre le robinet c', et la chambre M se remplit de vapeur pure d'éther. En fermant c' et en ouvrant c, on fait que cette quantité de vapeur se diffuse dans le tube d'expérience où l'absorption a lieu; on introduit successivement dans le tube de nouvelles mesures de vapeur, et l'on prend note des effets produits par chacune d'elles.

Dans le tableau suivant, la mesure prise pour unité est un centième de pouce cube.

ÉTHER SULFURIQUE

	Absorption	
Mesures.	Observée	Calculée
1	5,0	4,6
2	10,5	9,2
4	19,2	18,4
5	24,5	23,0
6	29,5	27,0
7	34,5	32,2
8	38,0	36,8
9	44,0	41,4
10	46,2	46.2
11	50,0	50,6
12	52,8	55,2
13	55,0	59.8
14	57,2	64,4
15	59,4	69,0

Nous trouvons ici que la proportion entre la densité et l'absorption se soutient sensiblement pour les onze premières mesures, après quoi les écarts de la proportionnalité deviennent de plus en plus grands.

Il n'est pas douteux que pour des mesures plus petites que un centième de pouce cube, la loi de la proportionnalité serait plus exactement et plus longtemps vérifiée. Dans un local convenable, il serait aisé de déterminer, avec une exactitude parfaite, le dixième de l'absorption produite par la première mesure, ce qui correspondrait à un millième de pouce cube de vapeur. Mais avant d'entrer dans le tube, la vapeur n'a que la tension due à la température du laboratoire, savoir, 12 pouces. Elle doit être multipliée par 2,5 pour être rendue égale à celle de l'atmosphère. D'où il suit que un millième de pouce cube de vapeur répandue dans un tube d'une capacité de 220 pouces cubes constitue une atmosphère dont la tension est une fraction de la pression atmosphérique mesurée par le produit $\frac{1}{229} \times \frac{1}{2.5} \times \frac{1}{100}$ ou un 550 000me.

Ces expériences avec l'éther et le gaz oléfiant montrent que non-seulement des corps gazeux à la tension ordinaire de l'atmosphère opposent un obstacle à la transmission de la chaleur rayonnante; non-seulement que les espaces intra-moléculaires ou intra-atomiques de ces gaz n'offrent pas un libre passage aux ondulations de l'éther, mais encore que leur densité peut être immensément abaissée au-dessous de la pression atmosphérique, sans que la porte si grande ouverte soit assez large pour laisser passer les ondulations. Il est dans la constitution des molécules individuelles si dispersées, si éparpillées, quelque chose qui les rend capables de détruire les ondes calorifiques. La destruction, toutefois, est purement dans la forme; il n'y a pas de perte absolue. Les rayons de chaleur traversent l'air sec sans l'échauffer sensiblement; ils ne peuvent pas passer aussi librement à travers le gaz oléfiant et la vapeur d'éther; mais chaque onde soustraite au faisceau rayonnant produit un mouvement équivalent dans la masse du gaz absorbant, et élève sa température. C'est un cas de transport, non pas d'anéantissement. Je pourrais étendre les expériences à tous les liquides suffisamment volatils et vous montrer que la même règle s'applique à toutes les vapeurs.

Avant de changer la source de chaleur employée jusqu'ici, je

désire vous entretenir un moment de l'action exercée par quelques gaz permanents sur la chaleur rayonnante. Pour mesurer les quantités introduites dans le tube d'expérience, nous avons recours au manomètre de la machine pneumatique. Le tableau qui suit donne les absorptions exercées par l'oxyde de carbone aux tensions assignées. On a pris pour unité l'action de l'air à la pression atmosphérique, action qui, comme vous vous le rappelez, détermine une déviation de 1°.

OXYDE DE CARBONE

Tension en pouces.	Absorption Observée	Absorption Calculée
0,5	2,5	2,5
1,0	5,0	5,0
1,5	8,0	7,5
2,0	10,0	10,0
2,5	12,0	12,5
3,0	15,0	15,0
3,5	17,5	17,5

Comme toujours, la troisième colonne est calculée dans l'hypothèse d'une absorption directement proportionnelle à la densité du gaz, et nous voyons que pour sept mesures, ou jusqu'à la tension de 3,5 pouces, la proportionnalité se soutient rigoureusement. Mais elle n'a plus lieu pour de grandes quantités de gaz ; quand, par exemple, l'unité de tension est 5 pouces au lieu d'un demi-pouce, nous obtenons le résultat suivant :

Tension en pouces.	Absorption Observée	Absorption Calculée
5	18	18
10	32,5	36
15	45	54

L'oxyde de carbone est donc tout à fait dans le cas du gaz oléfiant. L'acide carbonique, l'acide sulfhydrique, le protoxyde d'azote, et d'autres gaz, quoique très-différents par l'énergie de leurs absorptions qui toutes surpassent celles de l'oxyde de carbone, se comportent de la même manière à l'égard de la

chaleur rayonnante, quand on les emploie en petites et en grandes quantités.

Ainsi donc, dans le cas de quelques gaz, nous trouvons, de la part de leurs atomes, une incapacité presque absolue à être ébranlés par les ondes de l'éther. Ils semblent demeurer en repos quand les ondulations les traversent, tandis que les atomes des autres gaz, atteints par ces mêmes ondulations, absorbent leur mouvement et deviennent eux-mêmes des centres de chaleur. Nous avons maintenant à examiner ce dont les corps gazeux sont capables sous ce dernier rapport; nous avons à rechercher si ces atomes ou ces molécules, susceptibles de participer au mouvement de l'éther dans des degrés si divers, ne sont pas caractérisés aussi par la faculté de *communiquer* du mouvement à l'éther à différents degrés, ou, pour employer le langage ordinaire, après avoir appris quelque chose du pouvoir de différents gaz, considérés comme *absorbants* de la chaleur rayonnante, nous avons maintenant à les étudier comme *rayonnants*.

Voici une disposition à l'aide de laquelle nous pouvons résoudre, dans ce qu'elle a d'essentiel, une question qui, jusqu'à présent, n'a reçu qu'une réponse négative. P (fig. 91) est la pile thermo-électrique avec ses deux réflecteurs coniques; S est un écran double en fer-blanc; A est un brûleur d'Argand, formé de deux anneaux concentriques percés de trous, alimenté par le tube *tt* en communication avec le gazomètre; C est une boule en cuivre qui, pendant les expériences, est chauffée au-dessous du rouge. Quand la boule chaude C est placée sur le brûleur, elle échauffe l'air en contact avec elle; il s'établit ainsi un courant ascendant qui agit quelque peu sur la pile. Pour neutraliser cette action, un grand cube de Leslie, L, plein d'eau à une température supérieure de quelques degrés à celle de l'air, est placé devant la face opposée de la pile. L'aiguille étant ainsi amenée à zéro, une légère pression d'eau force le gaz à sortir par les orifices du brûleur; il rencontre la boule C, glisse contre sa surface, et s'élève, sous forme de courant chaud, en face de la pile. Les rayons émanés du gaz chauffé s'élancent dans la direction des flèches contre la pile, et la déviation qu'ils

produisent sur l'aiguille du galvanomètre indique la grandeur de la radiation.

Les résultats des expériences sont donnés dans la seconde co-

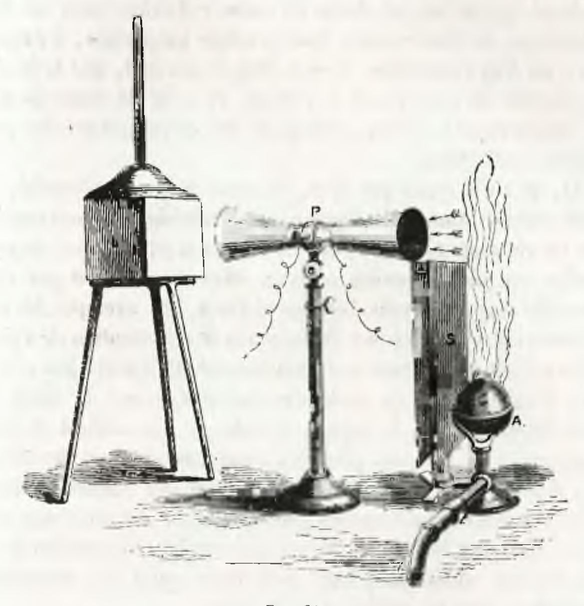


Fig. 91.

lonne du tableau suivant; les nombres qu'elle renferme expriment la limite extrême à laquelle parvient l'aiguille, quand les rayons émanés du gaz tombent sur la pile :

	Rayonnement.	Absorption.
Air	0	0,2
Oxygène.	0	0,2
Azote	0	0,2
Hydrogène.	0	0,2
Oxyde de carbone. .	12	18,0
Acide carbonique. .	18	25,0
Bioxyde d'azote . .	29	44,0
Gaz oléfiant	53	61,0

Pour comparer le rayonnement avec l'absorption, j'ai placé dans la troisième colonne les déviations dues à l'absorption des mêmes gaz, à la tension commune de 5 pouces. Nous voyons que le rayonnement et l'absorption marchent de front; que la molécule qui se montre douée du pouvoir d'*intercepter* un flux calorifique, se montre apte, dans la même proportion, à *engendrer* un flux calorifique. C'est-à-dire, en un mot, que la faculté de prendre du mouvement à l'éther, et celle de communiquer du mouvement à l'éther, sont pour les corps gazeux des propriétés corrélatives.

Et, qu'on le remarque bien, ici nous sommes affranchis de toute considération de l'influence que la cohésion pourrait exercer sur les résultats obtenus. Dans les solides et les liquides, les particules sont plus ou moins esclaves, elles ne peuvent pas être considérées comme individuellement libres. Par exemple, les différences entre les pouvoirs de radiation et d'absorption de l'alun et du sel gemme peuvent être légitimement attribuées à leur caractère d'agrégats ou de molécules enchaînées par la force de cristallisation. Mais la différence entre le gaz oléfiant et l'air atmosphérique ne peut plus être expliquée de cette manière; elle dépend essentiellement de la condition des molécules individuelles dont ces substances sont formées, de sorte que nos expériences sur les gaz et les vapeurs sondent la question de la constitution atomique à une profondeur qu'il est impossible d'atteindre avec les solides et les liquides.

Je me suis abstenu de vous donner, aussi complet que les expériences faites avec l'appareil déjà décrit m'auraient permis de le faire, le tableau des pouvoirs d'absorption des gaz, parce que je savais avoir en réserve des résultats obtenus avec un autre appareil qui permet de résoudre bien mieux la question. Cette seconde disposition est la même en principe que la première; seulement on y a fait deux changements importants. Le premier est qu'au lieu de prendre pour source de chaleur un cube d'eau bouillante, je me suis servi d'une plaque de cuivre, contre laquelle vient frapper la flamme de gaz mince et fixe d'un brûleur de Bunsen; la plaque chauffée forme le fond extérieur de

ma nouvelle chambre antérieure, dans laquelle on peut faire séparément le vide comme auparavant. Cette portion de l'appareil est esquissée dans la figure 92 ; on y a ajouté la cheminée G.

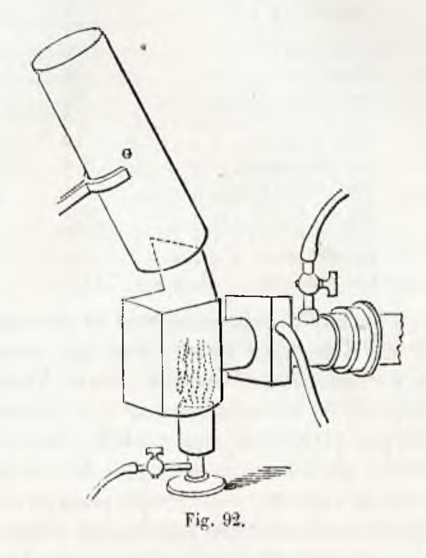


Fig. 92.

Le second changement est la substitution au tube d'expérience S S′ en laiton, planche I, d'un tube de verre de même diamètre, et long de près d'un mètre. Toutes les autres parties de l'appareil restent ce qu'elles étaient auparavant. Les gaz étaient introduits, de la manière déjà décrite, dans le tube d'expérience, et l'on calculait l'absorption de chaque gaz d'après la déviation du galvanomètre, consécutive à son entrée dans le tube.

Le tableau suivant donne les absorptions relatives de plusieurs gaz, à la tension commune d'une atmosphère :

Noms.	Absorption à 30 pouces de tension.
Air.	1
Oxygène	1
Azote.	1
Hydrogène	1
Chlore.	39
Acide chlorhydrique	62
Oxyde de carbone.	90
Acide carbonique	90
Bioxyde d'azote	355
Acide sulfhydrique.	390
Gaz des marais	403
Acide sulfureux	710
Gaz oléfiant.	970
Gaz ammoniac.	1195

Le moyen d'épreuve le plus puissant et le plus délicat qu'il m'ait été donné d'employer ne m'a donc pas encore permis d'établir une différence entre l'oxygène, l'azote, l'hydrogène et l'air. L'absorption de ces substances est excessivement petite, probablement plus petite que je ne l'ai faite. Plus ces gaz ont été parfaitement purifiés ou séchés, plus leur action se rapproche de celle du vide. Et, encore, qui pourrait dire que le meilleur appareil dessiccateur soit parfaitement efficace? Je n'oserais même pas affirmer que l'acide sulfurique, quoique pur, ne cède pas un peu de vapeur aux gaz qui le traversent, et ne fasse ainsi paraître l'absorption par ces gaz plus grande qu'elle ne doit l'être. Les robinets aussi doivent être graissés, et peuvent par là communiquer une impureté infinitésimale à l'air qui les a traversés. Quoi qu'il en soit, il est certain que si l'on parvenait à une purification plus parfaite des gaz dont l'action est la plus faible, cela ne servirait qu'à augmenter les différences énormes d'absorption données par le tableau précédent.

Le gaz ammoniac, à la tension d'une atmosphère, exercé une absorption égale à 1 195 fois, au moins, celle de l'air. Si j'interpose cet écran de métal entre la pile et le tube à expérience, l'aiguille avance un peu, mais si peu que vous ne pourrez pas du tout vous en apercevoir. Que signifie cette expérience? Pourquoi ce gaz ammoniac, qui dans notre tube de verre est

aussi transparent à la lumière que l'air que nous respirons, est-il tellement opaque pour la chaleur qui rayonne de notre source, que l'addition d'une plaque de métal augmente à peine l'opacité. J'ai des raisons de croire qu'elle ne l'augmente pas du tout, et que ce gaz, transparent pour la lumière, est, en réalité, aussi noir actuellement pour les rayons calorifiques, que si le tube d'expérience était plein d'encre, de poix, ou de toute autre substance imperméable.

Dans le cas de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène et de l'air, l'action à la pression d'une atmosphère est si petite, qu'il serait tout à fait inutile d'essayer de déterminer l'action de ces mêmes gaz sous la pression d'une fraction d'atmosphère. Si cependant nous parvenions à réaliser cette détermination, la différence entre ces quatre gaz et les autres apparaîtrait bien plus énorme que dans le dernier tableau. Dans le cas des gaz à absorption énergique, nous savons que les rayons calorifiques sont absorbés en bien plus grande abondance par les portions de gaz qui entrent les premières dans le tube à expérience, et que les portions entrées les dernières produisent, dans plusieurs cas, un effet infiniment petit. Si donc, au lieu de comparer les gaz à la tension commune d'une atmosphère, nous les comparions à la tension commune d'un pouce, nous trouverions sans aucun doute que la différence entre les gaz les moins absorbants et les gaz les plus absorbants s'est considérablement accrue. Nous avons déjà appris que pour de petits volumes, la chaleur absorbée est proportionnelle à la quantité de gaz présent. En supposant que cela soit vrai pour l'air et les autres gaz à absorption faible qui lui ressemblent, en admettant, par exemple, que leur absorption à 1 pouce de tension soit le trentième de l'absorption à 30 pouces, nous arrivons aux nombres du tableau suivant. On comprendra, sans que nous le disions, que dans chaque cas, excepté dans les quatre premiers, l'absorption du gaz à la pression d'un pouce a été déterminée par des expériences directes.

Noms.	Absorption à 1 pouce de tension.
Air	1
Oxygène.	1
Azote	1
Hydrogène	1
Chlore.	60
Brome.	160
Oxyde de carbone	750
Acide bromhydrique	1 005
Protoxyde d'azote.	1 590
Bioxyde d'azote.	1 860
Acide sulfhydrique.	2 100
Gaz ammoniac.	7 260
Gaz oléfiant	7 950
Acide sulfureux.	8 800

Quelles différences extraordinaires ces nombres révèlent dans la constitution ou le caractère spécifique des dernières particules des différents gaz ! Pour chaque rayon individuel abattu par l'air, l'oxygène, l'hydrogène ou l'azote, le gaz ammoniac abat une brigade de 7 260 rayons, le gaz oléfiant une brigade de 7 950 rayons, tandis que l'acide sulfureux en détruit 8 800. Avec ces résultats sous les yeux, nous avons peine à résister à l'envie d'essayer de voir les atomes en eux-mêmes, c'est-à-dire de discerner avec les yeux de l'intelligence les qualités physiques dont dépendent actuellement ces différences énormes. Ces atomes sont des particules de matière, plongées dans un milieu élastique, recevant de lui le mouvement et lui communiquant leurs mouvements. Avons-nous perdu tout espoir fondé d'arriver un jour à faire de la chaleur rayonnante un *réactif si sensible* de la constitution atomique que nous puissions conclure de leur action sur elle le mécanisme des dernières particules de la matière elle-même ?

N'entrevoyons-nous même pas maintenant les qualités nécessaires pour former un bon absorbant? Vous vous souvenez de nos expériences avec l'or, l'argent et le cuivre ; vous vous rappelez combien ils rayonnent faiblement, et combien ils absorbent faiblement. Nous les chauffions avec de l'eau bouillante, c'est-à-dire que nous communiquions, par le contact de l'eau, du mouve-

ment à leurs atomes; mais ce mouvement se communiquait avec une extrême lenteur à l'éther dans lequel ces atomes flottaient. On peut conclure de la longueur du temps dont ils avaient besoin pour se refroidir dans le vide, que leurs particules glissaient à travers l'éther, sans en éprouver de résistance sensible. Mais nous avons vu que quand le mouvement possédé par les atomes de ces corps et qu'ils sont impuissants à transmettre à l'éther, était communiqué, par contact, à une couche de vernis, ou à une couche de craie ou de noir de fumée, ou même à de la flanelle ou du velours, ces corps se dépouillaient bien vite de leur mouvement au profit de l'éther. Nous avons trouvé que la même chose avait lieu pour le verre et les poteries.

Par quoi ces corps qui rayonnent bien diffèrent-ils des métaux que nous avons nommés? Par une particularité essentielle, les métaux *sont des éléments*, ou *corps simples*, les autres *sont des corps composés*. Dans les métaux, les atomes oscillent isolés, dans le vernis, le velours, la poterie et le verre, ils oscillent en groupes. Or, voici que, dans des corps aussi différents des métaux qu'on puisse l'imaginer, apparaît le même fait significatif. L'oxygène, l'hydrogène, l'azote et l'air, sont des corps simples ou des mélanges de corps simples, et leur impuissance se manifeste à la fois pour le rayonnement et pour l'absorption. Ils oscillent au sein de l'éther, sans presque rien perdre de leur mouvement ou de leur force vive. Ils sont, par rapport aux gaz composés, ce qu'est un cylindre uni tournant dans l'eau, comparé à une roue à palettes. Ils produisent une perturbation comparativement très-petite.

Nous pouvons pousser encore plus loin ces considérations. Il est impossible de n'être pas frappé de la position occupée par le chlore et le brome dans le dernier tableau. Le chlore est un gaz extrêmement dense et coloré ; la vapeur du brome l'est encore bien davantage; cependant nous les trouvons, quant à la perméabilité pour la chaleur de notre source, placés au-dessus de tous les gaz transparents composés. L'aste de la combinaison avec l'hydrogène produit, dans le cas de chacune de ces substances, un composé transparent; mais l'action chimique,

qui augmente la transparence pour la lumière, augmente l'opacité pour la chaleur, l'acide chlorhydrique absorbe plus que le chlore, et l'acide bromhydrique absorbe plus que le brome.

Bien plus, j'ai ici du brome à l'état liquide ; j'en verse une certaine quantité dans cette auge en verre ; la couche est d'une épaisseur suffisante pour éteindre tout à fait la flamme d'une lampe ou d'une chandelle. Je place une chandelle en avant de l'auge ; derrière celle-ci une pile thermo-électrique ; le mouvement rapide de l'aiguille annonce le passage de la chaleur rayonnante à travers le brome. Cette chaleur se compose uniquement des rayons obscurs de la chandelle ; car la lumière, comme je l'ai montré, est tout à fait interceptée. Je retire la chandelle, et je mets à sa place notre boule de cuivre, qui n'est pas chauffée tout à fait au rouge. L'aiguille va butter aussitôt contre ses arrêts, mettant en évidence la transparence du brome pour la chaleur émise par la boule. Je ne puis me servir d'iode à l'état solide; mais, heureusement, il se dissout dans le bisulfure de carbone. Voici la dissolution fortement colorée dans cette auge en verre ; je projette un faisceau électrique de rayons parallèles sur l'écran, et vous constatez que la solution d'iode intercepte complétement la lumière ; mais si je place ma pile sur le chemin du faisceau, la violence du départ de l'aiguille montre combien est abondante la transmission des rayons obscurs. Il est impossible, il me semble, de fermer les yeux à cet ensemble de preuves, et de ne pas admettre que les atomes libres oscillent à l'aise dans l'éther, tandis que lorsqu'ils sont groupés en systèmes oscillants, ils font gonfler en quelque sorte les ondes de l'éther qui, alors, communiquent à ces atomes groupés des quantités de mouvement qu'elles étaient impuissantes à leur communiquer aussi longtemps que les atomes restaient libres et isolés.

Mais vous m'objecterez sans doute que le noir de fumée, substance élémentaire ou simple, est un des corps de la nature qui absorbent et qui rayonnent le mieux. Examinons un peu cette substance : le noir de fumée ordinaire contient diverses impuretés ; il résulte de la condensation de plusieurs hydrocarbures, doués tous d'un grand pouvoir absorbant et rayonnant. Le noir

de fumée, tel que nous l'avons employé jusqu'ici, peut donc difficilement être considéré comme un corps simple. J'ai écarté la plus grande partie des hydrocarbures, en faisant passer un courant de chlore à travers le noir de fumée chauffé au rouge; il n'en a pas moins continué à être tout à la fois fortement rayonnant et fortement absorbant. Mais enfin, *qu'est-ce* que du noir de fumée? Les chimistes vous diront que c'est une forme allotropique du diamant, et voici, en effet, du diamant réduit à l'état de charbon par une chaleur intense. Cela posé, on a longtemps attribué l'état ou la condition allotropique des corps à un nouvel arrangement de ses molécules. S'il en est ainsi, pourquoi ce nouvel arrangement, qui produit une différence physique aussi marquée entre le noir de fumée et le diamant, ne serait-il pas un groupement atomique tel, que le corps, quoique toujours simple, agirait sur la chaleur rayonnante, comme s'il était composé. Je dis qu'un arrangement semblable des molécules d'un corps simple, quoique exceptionnel, peut très-bien se concevoir; et je vous montrerai que c'est ce qui a lieu à un degré très-prononcé pour une forme allotropique de notre oxygène, si grandement inactif.

Mais, en réalité, le noir de fumée n'est pas aussi impénétrable que vous pourriez le supposer. Melloni a montré qu'il était transparent, à un degré inattendu, pour la chaleur rayonnante émanant d'une source à basse température, et j'ai préparé une expérience qui confirme la sienne. Voici une plaque de sel gemme, tenue quelque temps au-dessus de la flamme d'une lampe fumeuse, et recouverte d'une couche de suie si épaisse, qu'elle ne laisse rien passer de la lumière du plus brillant bec de gaz. Je place la plaque sur son support, puis entre elle et ce vase d'eau bouillante, qui nous servira de source de chaleur, je dresse un écran. La pile thermo-électrique est de l'autre côté de la plaque enfumée. L'aiguille est maintenant à zéro, et je retire mon écran; aussitôt l'aiguille part; sa déviation définitive et permanente est de 52°. Je nettoie parfaitement le sel, et je détermine le rayonnement à travers la plaque non enfumée; il est de 71°. Or, la déviation de 52°, exprimée au moyen de nos unités ordi-

naires, devient 90; la déviation de 71°, mesure du rayonnement total, est d'environ 300. Donc le rayonnement à travers la suie est au rayonnement total comme :

90 : 300

ou comme 30 : 100

c'est-à-dire que 30 pour 100 de la chaleur incidente ont été transmis par la couche de noir de fumée.

Je vous ai montré l'action exercée par les gaz sur la chaleur rayonnante avec le second tube d'expérience en verre et la nouvelle source de chaleur ; complétons cette leçon par quelques mots sur l'action des vapeurs. Voici plusieurs éprouvettes de verre, munies chacune d'un capuchon en laiton, portant un robinet. Je verse dans chaque éprouvette une certaine quantité d'un liquide volatil, d'un liquide unique pour chaque éprouvette, afin d'éviter tout mélange des vapeurs. J'extrais de chaque éprouvette, non-seulement l'air situé au-dessus du liquide, mais l'air dissous dans le liquide, qui monte librement à la surface quand on fait jouer la machine pneumatique. Je visse l'éprouvette au tube d'expérience, où l'on a fait le vide, et je fais en sorte que la vapeur y pénètre sans qu'il y ait d'ébullition. La colonne de mercure du tube manométrique s'abaisse, et quand j'ai obtenu la dépression voulue, je ferme l'entrée à la vapeur. On a examiné de cette manière les vapeurs des substances désignées dans le tableau ci-dessous, aux tensions de 0,1 ; 0,5, et 1 pouce, respectivement.

Noms.	Absorption des vapeurs aux tensions. 0,1	0,5	1,0
Bisulfure de carbone	15	47	62
Iodure de méthyle. . .	35	147	242
Benzol.	66	182	267
Chloroforme	85	182	236
Alcool méthylique . . .	109	390	590
Amylène.	182	535	823
Ether sulfurique . . .	300	710	870
Alcool	325	622	
Éther formique.. . . .	480	870	1075
Éther acétique	590	980	1195
Propionate d'éthyle . .	596	970	
Éther boracique. . .	620		

Dans le calcul de ces nombres, on a pris pour unité l'absorption produite par l'air sec à la tension d'une atmosphère entière. Il en résulte que l'absorption d'un dixième de pouce de vapeur de bisulfure de carbone est 15 fois, celle d'un dixième de pouce cube de vapeur d'éther 620 fois, l'absorption de 30 pouces d'air atmosphérique. En comparant l'air à la tension d'un centième de pouce avec l'éther boracique à la même tension, on trouverait probablement que l'absorption du second est 180 000 fois celle du premier.

APPENDICE A LA LEÇON X

Je donne ici la méthode de calibrage ou de division du cadran du galvanomètre que Melloni recommande, comme ne laissant rien à désirer sous le rapport de la facilité, de la promptitude et de la précision. (*Thermochrose*, page 59.)

On prend deux petits vases V,V′, à moitié pleins de mercure et on les fait communiquer séparément aux extrémités G,G′ d'un galvanomètre, moyennant deux fils métalliques. Ces vases et ces fils ainsi disposés ne changent rien aux habitudes de l'instrument, et le courant thermo-électrique est librement transmis, comme auparavant, de la pile au galvanomètre par les fils ordinaires. Mais si au moyen d'un fil F, on établit une communication entre les deux vases, une partie du courant passera par ce fil et rentrera dans la pile; la quantité d'électricité qui circulera dans le galvanomètre sera donc diminuée, et, avec elle, la déviation du système astatique.

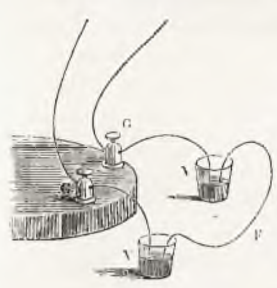


Fig. 93.

Plus on facilitera le passage du courant de l'un à l'autre vase, en lui offrant pour conducteur un fil plus gros ou plus court, et plus le système astatique dévié sous l'action d'un rayonnement calorifique constant se rapprochera de zéro.

Supposons donc que par cet artifice on ait réduit la déviation galvanométrique à sa quatrième ou cinquième partie : en d'autres termes supposons que l'index du rhéomètre étant à 10 ou 12 degrés sous l'action d'une source calorifique constante placée à une certaine distance de la pile, les aiguilles descendent à 2 ou 3 degrés, lorsqu'on fait dériver une portion du courant par le moyen du fil extérieur. Je dis

qu'en faisant varier l'éloignement de la source, et en observant à chaque fois la déviation totale et la déviation réduite, on obtiendra toutes les données nécessaires pour déterminer les rapports cherchés entre les arcs parcourus par l'index de l'instrument et les forces correspondantes.

Pour rendre l'exposition plus claire et fournir en même temps un exemple de la manière d'opérer, je vais prendre les nombres relatifs à l'application de ce procédé à l'un de mes thermomultiplicateurs.

Le circuit additionnel étant rompu, et la source constante de chaleur assez éloignée du corps thermoscopique pour ne donner que 5 degrés au galvanomètre, on plaça le fil de déviation, et l'index tomba à 1°,5. La communication entre les deux vases étant de nouveau interrompue on rapprocha la source calorifique de manière à obtenir successivement :

5°. 10°. 15°. 20°. 25°. 30°. 35°. 40°. 45°.

et en interposant à chaque déviation nouvelle le même fil de déviation on eut les nombres suivants :

1°,5. 3°. 4°,5. 6°,5. 8°,4. 11°,2. 15°,5. 22°,4. 29°,7.

Or, si l'on suppose que la force nécessaire à l'index du galvanomètre pour décrire chacun des premiers degrés du cadran soit égale à l'unité on aura d'abord 5 pour l'expression de la force correspondante à la première observation. Les autres forces s'obtiendront aisément par la proportion :

$$1{,}5 : 5 :: a : x = \frac{1}{1{,}5}\, a = 3{,}333.\ a\ [1].$$

a représentant la déviation de l'index lorsque le circuit extérieur est fermé. On aura ainsi :

5. 10. 15,2. 21. 28. 37,3.

pour les forces correspondantes aux déviations

5°. 10°. 15°. 20°. 25°. 30°.

Ainsi dans cet instrument les forces sont sensiblement proportionnelles aux arcs jusque près de 15 degrés. Au delà elles commencent à s'écarter de la proportionnalité, et d'autant plus que la déviation devient plus grande. Voilà pourquoi on n'a pas poussé le calcul au delà le 30e degré, car alors la valeur de a surpasse la limite de la proportionnalité.

Les forces appartenant aux degrés intermédiaires s'obtiennent avec

[1] C'est-à-dire qu'un courant réduit est au courant total auquel il correspond, comme un autre courant réduit est au courant total correspondant.

la plus grande facilité soit par le calcul, soit par la construction graphique qui est bien suffisante à ces sortes d'évaluations, lesquelles n'exigent pas une précision supérieure au dixième de l'unité.

Par ces moyens, on trouve :

Degrés.	13°.	14°.	15°.	16°.	17°.	18°.	19°.	20°.	21°.
Forces	13.	14,1.	15,2.	16,3.	17,4.	18,6.	19,8.	21.	22,3.
Différences. . .	1,1.	1,1.	1,1.	1,1.	1,2.	1,2.	1,2.	1,3.	
Degrés.	22°.	23°.	24°.	25°.	26°.	27°.	28°.	29°.	30°.
Forces	23,5.	24,9.	26,4.	28.	29,7.	31,5.	33,4.	35,3.	37,3.
Différences. . .	1,4.	1,5.	1,6.	1,7.	1,8.	1,9.	2.		

Il n'est point question dans ce tableau des degrés qui précèdent le 13e, parceque la force correspondante à chacun d'eux possède exactement la même valeur que la déviation.

Les forces appartenant aux 30 premiers degrés étant connues, rien de plus facile que de déterminer les valeurs des forces correspondantes à 35, à 40, à 45 degrés et au delà, forces que nous n'avons pu calculer d'abord parce que les déviations réduites outrepassaient la limite de leur proportionnalité aux espaces parcourus par l'index de l'instrument.

En effet les déviations réduites de ces trois arcs sont :

15°,5. 22°,4. 29°,7.

Considérons-les séparément en commençant par la première.

D'abord 15 degrés équivalent d'après notre tableau à 15,2 : Quant à la valeur x de la décimale 0,5, on l'obtiendra en multipliant cette fraction par la différence 1,1 qui existe entre le 15e et le 16e degré; car on a évidemment la proportion :

$$1 : 1{,}1 :: 0{,}5 : x = 0{,}5.$$

La valeur de la déviation réduite correspondante au 35e degré ne sera donc pas 15°,5, mais 15°,2 + 0,5 = 15°,5. On trouvera par des considérations analogues 23°,5 + 0°,6 = 24°,1 et 35°,1 + 1°,4 = 36°,5, au lieu de 22°, et 29°,7, pour les déviations réduites de 40 et de 45 degrés.

Maintenant il ne restera plus qu'à calculer les valeurs des formes appartenant à ces trois déviations, 15°,5. 24°,1. et 36°,7, au moyen de l'expression 3,333 a, ce qui donne :

Pour les forces. . . .	51,7.	80,3.	122,3.
Pour les degrés . . .	35.	40.	45.

En comparant ces nombres avec ceux du tableau précédent, on voit que la sensibilité de notre galvanomètre diminue considérablement lorsqu'on opère sur des déviations supérieures au 30e degré.

LEÇON XI

(3 AVRIL, 1862)

Action des substances odorantes sur la chaleur rayonnante. — Action de l'ozone sur la chaleur rayonnante. — Détermination du rayonnement et de l'absorption des gaz et des vapeurs sans source aucune de chaleur extérieure au corps gazeux. — Radiation à travers l'atmosphère de la terre. — Influence de la vapeur d'eau de l'atmosphère sur la chaleur rayonnante. — Influence des pouvoirs rayonnant et absorbant de la vapeur d'eau sur les phénomènes météorologiques.

APPENDICE. — Détails ultérieurs sur l'action de l'air humide.

Les odeurs et les effluves en général ont longtemps occupé l'attention des observateurs; on a pris plaisir à leur demander les démonstrations les plus frappantes de la divisibilité indéfinie de la matière. Aucun chimiste n'a osé essayer de peser le parfum d'une rose; mais nous avons dans la chaleur rayonnante un moyen d'épreuve plus délicat que toutes les balances. Les résultats énoncés dans notre dernière leçon vous ont disposés à m'entendre dire, sans en être par trop surpris, que la quantité de matière volatile qu'une personne de cet auditoire extrairait d'un flacon d'esprit de corne de cerf par une seule aspiration du nez exercerait sur la chaleur rayonnante une action plus forte que la masse totale d'oxygène et d'azote de cette salle. Appliquons ce moyen d'épreuve à d'autres odeurs, et voyons si, à leur tour, malgré leur subtilité presque infinie, elles n'exercent pas une influence sensible et mesurable sur la chaleur rayonnante.

J'opérerai tout simplement comme il suit : Voici un certain nombre de petits carrés égaux de papier buvard, que je roule en

20.

petits cylindres dont chacun a cinq centimètres de longueur. J'humecte les cylindres en les plongeant par une de leurs extrémités dans une huile aromatique; l'huile pénètre dans le papier en vertu de l'attraction capillaire, et le cylindre tout entier en est maintenant imprégné. J'introduis le papier ainsi roulé et humecté dans un tube de verre, d'un diamètre tel que le cylindre le remplisse sans être pressé; puis, entre mon appareil dessiccateur et le tube d'expérience, je place le tube contenant le papier aromatisé. Le vide est fait actuellement dans le tube d'expérience, et l'aiguille est à zéro; en ouvrant ce robinet, je fais passer doucement de l'air sec à travers les plis du papier saturé. Cet air sec se sature du parfum de l'huile aromatique, et l'entraîne dans le tube d'expérience. Nous savons que l'absorption d'une atmosphère d'air sec, prise pour unité, produit une déviation d'un degré; donc toute absorption additionnelle ou plus grande que l'unité révélée par l'expérience sera due à l'odeur dont l'air est accompagné.

Le tableau suivant donnera une idée sommaire de l'absorption exercée par les substances qui y sont désignées, celle de l'air à la tension d'une atmosphère étant prise pour unité :

PARFUMS.

Noms des parfums.	Absorption.
Pachouli	30
Bois de sandal	32
Géranium	33
Essence de girofle	33,5
Essence de roses	36,5
Bergamotte.	44
Neroli	47
Lavande	60
Citron	65
Orange.	67
Thym	68
Romarin	74
Huile de lauriers	80
Fleurs de camomille. . .	87
Casse	109
Grande lavande	355
Anisette..	372

Le nombre des atomes de l'air qui remplit le tube doit être regardé comme presque infini en comparaison du nombre des atomes des odeurs; et cependant ceux-ci, si clair-semés qu'ils soient, font une exécution de rayons calorifiques égale dans le cas du pachouli à 30 fois, de l'essence de rose à 36 fois, du thym à 74 fois, de la grande lavande à 355 fois, de l'anisette à 372 fois l'exécution causée par l'air. Il serait oiseux de chercher à évaluer les quantités de matières qui produisent ces résultats. Probablement qu'il faudrait les multiplier par des millions, pour arriver à représenter la tension de l'air ordinaire. Ainsi,

Le doux vent du midi
Qui souffle sur une plate-bande de violettes,
En dérobant et répandant son odeur,

doit son parfum à un agent qui, quoique presque infiniment atténué, peut plus, pour intercepter le rayonnement terrestre, que l'atmosphère entière depuis la plate-bande jusqu'au firmament. En outre de ces expériences sur les huiles essentielles, j'en ai fait d'autres avec des herbes aromatiques. Un certain nombre d'entre elles venaient du marché de *Covent garden;* elles étaient sèches, dans l'acception ordinaire du mot; c'est-à-dire qu'elles n'étaient pas vertes, mais fanées. Cependant je crains que les résultats qu'elles ont données ne puissent pas être considérés comme rigoureux, parce que probablement il y avait quelque mélange de vapeur aqueuse. La partie aromatique des plantes était tassée dans un tube de verre de $1^m,50$ de long et de 8 millimètres de diamètre. Avant de les fixer au tube d'expérience, on les mettait sur le trajet de l'air aspiré par une seconde machine pneumatique, et l'on faisait passer sur elles pendant quelques minutes un courant d'air sec; on les mettait alors en communication avec le tube d'expérience, et l'on opérait comme avec les vapeurs d'huiles essentielles, avec cette seule différence que les herbes occupaient une longueur de $1^m,50$ au lieu de 5 centimètres.

Le thym, examiné de cette manière, a donné une action égale à 33 fois, la menthe poivrée à 34 fois, la menthe crépue à 38 fois, la lavande à 32 fois, l'absinthe à 41 fois, la canelle à 53 fois l'action de l'air.

Ainsi que je l'ai déjà dit, je crains que ces résultats ne soient compliqués de l'action de la vapeur d'eau ; cependant la quantité de cette vapeur n'a pu être qu'infiniment petite.

Il est une autre substance d'un grand intérêt pour les chimistes, qu'on n'a pu obtenir jusqu'ici qu'en quantité si petite qu'elle échappe presque à toute mesure, et à laquelle nous pouvons appliquer l'épreuve de la chaleur rayonnante. Je veux parler de l'ozone cette substance extraordinaire. Elle paraît à l'électrode où vient l'oxygène quand l'eau est décomposée par le courant électrique. Pour étudier son action j'ai construit trois auges différentes de décomposition. Dans la première, que j'appellerai n° 1, les lames de platine employées comme électrodes avaient chacune environ quatre pouces carrés de surface, les lames de la seconde n° 2 avaient deux pouces carrés de surface; et les lames de la troisième n° 3 avaient seulement un pouce carré de surface chacune.

La raison qui m'a porté à employer des électrodes de dimensions différentes était celle-ci : La première fois que j'ai appliqué la chaleur rayonnante à l'examen de l'ozone, j'avais construit une auge de décomposition dans laquelle, pour diminuer la résistance du courant, j'avais employé de très-grandes lames de platine. L'oxygène ainsi obtenu, et qui devait contenir l'ozone, manifestait à peine quelques-unes des réactions de cette substance. Il décolorait très-faiblement l'iodure de potassium, et restait presque sans action sur la chaleur rayonnante. J'essayai un second appareil de décomposition, avec des plaques plus petites, et je constatai une action très-marquée sur l'iodure de potassium et sur la chaleur rayonnante. Ne pouvant attribuer ces différences à d'autre cause qu'à la différence de grandeur des plaques, j'attaquai de front la question en opérant avec les trois caisses décrites ci-dessus. Si nous prenons pour unité l'action de la portion dominante de l'oxygène électrolytique, l'action de la portion accessoire ou de l'ozone qui l'accompagnait, dans les trois cas, est donnée dans le tableau suivant :

N° des auges.	Absorption.
N° 1.	20
N° 2.	34
N° 3.	47

Ainsi la quantité d'ozone qui accompagnait l'oxygène, quantité infiniment petite relativement, a exercé, dans le premier cas, une action égale à 20 fois celle de l'oxygène, tandis qu'avec la troisième paire de plaques l'ozone était quarante-sept fois plus énergique que l'oxygène. L'influence de la dimension des plaques, ou, en d'autres termes, de la *densité* du courant, qui traverse le liquide, sur la production de l'ozone, est rendue évidente d'une manière frappante par ces expériences.

Je coupai alors les plaques de l'auge n° 2, de manière à les rendre plus petites que celles du n° 3; et la réduction de surface fut accompagnée d'une augmentation d'action sur la chaleur rayonnante; l'absorption s'éleva à l'instant de 34 à

65.

Les plaques réduites n° 2 l'emportèrent donc sur les plaques n° 3, qui dans les premières expériences, avaient exercé l'action la plus grande.

Les plaques n° 3 furent réduites à leur tour de manière à devenir les plus petites de toutes, et l'ozone alors engendré par le n° 3, produisit une absorption égale à

85.

Nous voyons donc que l'action exercée sur la chaleur rayonnante augmente à mesure que les dimensions des électrodes diminuent.

On sait que la chaleur est un agent très-destructeur de l'ozone, et craignant l'influence de la chaleur développée dans les petits électrodes de la dernière auge mise en expérience, j'entourai cette auge d'un mélange de sel et de glace pilée. Pendant qu'elle fut ainsi maintenue froide, l'absorption par l'ozone engendré s'est élevé à

136.

Les expériences relatives à l'action de l'ozone sur la chaleur rayonnante étaient faites quand j'eus connaissance des recherches dont cette substance avait été l'objet de la part de MM. de la Rive, Soret et Meidinger. Or il existe entre nos résultats une concordance parfaite, quoiqu'il n'y ait aucune ressemblance entre nos méthodes d'expérimentation. Cet accord vint très à propos augmenter notre confiance dans la chaleur rayonnante, en tant que moyen d'étudier l'état moléculaire [1] des corps.

Il est impossible de mesurer par les moyens ordinaires les quantités d'ozone avec lesquelles ont été faites ces expériences. Cependant son action sur la chaleur rayonnante est si énergique,

[1] M. Meidinger commence par constater le défaut d'accord entre la théorie et l'expérience dans la décomposition de l'eau, défaut d'accord qui se manifeste d'une manière très-marquée par un *déficit* du côté de l'oxygène *quand le courant est fort*. En chauffant son liquide électrolytique, il trouva que cette différence disparaissait, et que le courant mettait en liberté la quantité d'oxygène voulue ou théorique. Il soupçonna alors que le déficit d'oxygène pouvait être dû à la formation de l'ozone; mais comment cette substance agirait-elle pour produire la diminution observée? Si le déficit d'oxygène est dû à la grande densité de l'ozone, la destruction de cette substance par la chaleur devrait rendre à l'oxygène son volume théorique. Cependant une forte chaleur, qui détruisait l'ozone, ne produisait aucune diminution de volume, d'où M. Meidinger concluait que l'effet qu'il observait n'était pas dû à l'ozone qui demeurait mêlé avec l'oxygène lui-même. De nouvelles études le conduisirent enfin à cette conclusion bientôt justifiée par des expériences satisfaisantes, que la perte d'oxygène est due à la formation dans l'eau, par l'ozone, de peroxyde d'hydrogène; l'oxygène étant ainsi enlevé au tube auquel il appartenait. Il fit aussi, comme M. de la Rive l'avait d'abord fait, des expériences avec des électrodes de différentes dimmensions, et il trouva la perte d'oxygène bien plus considérable avec un petit électrode qu'avec un grand; d'où il conclut que la formation de l'ozone était facilitée par *l'augmentation de la densité du courant à l'endroit où l'électrode et l'électrolyte se touchent*. Mes expériences avec la chaleur rayonnante conduisent à la même conclusion. On ne peut rien concevoir de plus différent que nos deux manières de procéder : M. Meidinger cherchait l'oxygène qui avait disparu, et il le trouva dans le liquide; j'examinais l'oxygène réellement dégagé, et j'ai trouvé que la quantité d'ozone mêlée avec lui augmente à mesure que les dimensions des électrodes diminuaient. Je puis ajouter que depuis la lecture du mémoire de M. Meidinger, j'ai répété ses expériences avec mes auges à décomposition, et que j'ai trouvé que celles qui me donnaient la plus grande absorption, montraient aussi le plus grand déficit dans la quantité d'oxygène dégagé.

qui si on le comparait volume à volume au gaz oléfiant, ou à l'éther boracique, il les surpasserait l'un et l'autre en pouvoir absorbant. Aucun des gaz élémentaires que j'ai examinés ne se comporte comme l'ozone, qui dans ses oscillations à travers l'éther, doit prodigieusement ébranler ce milieu. Si c'est de l'oxygène, ce doit être de l'oxygène formé d'atomes réunis en groupes. J'ai cherché, de la manière suivante, à décider la question de savoir si c'est de l'oxygène, ou un composé d'hydrogène. La chaleur détruit l'ozone. Si c'est de l'oxygène seulement, la chaleur le convertira en oxygène ordinaire; si c'est le composé d'hydrogène, que quelques chimistes pensent, la chaleur le convertira en oxygène additionné de vapeur d'eau. Le gaz pur, introduit dans mon tube, donnerait l'action neutre de l'oxygène; le gaz additionné de vapeur d'eau aurait dû produire, je l'espérais du moins, une action sensiblement plus grande. Jusqu'à présent je n'ai pas encore pu établir avec certitude une différence entre l'action du gaz sec et celle du gaz non desséché. Si tant est que l'action de la chaleur développe de la vapeur d'eau, les procédés expérimentaux que j'ai employés ne m'ont pas encore mis en état de la découvrir. Pour le moment, je suis porté à croire que l'ozone est produit par la réunion des atomes de l'oxygène élémentaire en groupes oscillants; et que la chaleur, en brisant le lien d'union, en permettant aux atomes d'osciller isolément, leur enlève ainsi la faculté soit d'intercepter, soit d'engendrer le mouvement qu'elles interceptaient ou engendraient quand ils étaient groupés en systèmes.

J'ai maintenant à appeler votre attention sur une série de faits qui m'ont surpris et embarrassé quand je les ai observés pour la première fois. Pendant que j'expérimentais en novembre dernier (1861), je laissai une fois entrer dans le tube d'expérience une quantité de vapeur d'alcool, suffisante pour faire baisser de cinq dixièmes de pouce le mercure du baromètre éprouvette; elle produisit une déviation de 72°. Tandis que l'aiguille marquait ce chiffre si élevé, avant de pomper la vapeur, je fis entrer dans le tube un courant d'air sec, et il m'arriva au moment où il entrait, de jeter les yeux sur le galvanomètre.

L'aiguille, à ma grande surprise, descendit promptement à zéro, et marcha jusqu'à 25° du côté opposé. L'entrée de l'air presque inerte, non-seulement neutralisa l'absorption observée précédemment, mais elle laissa un excédant de compte considérable en faveur de la face de la pile tournée vers la source. Une seconde expérience fit descendre l'aiguille de 70° à zéro, et l'envoya à 38° du côté opposé. Une très-petite quantité de vapeur d'éther sulfurique, introduite de la même manière, avait produit une déviation de 30°, puis lorsque je permis à l'air sec de remplir le tube, l'aiguille descendit rapidement à zéro, et s'élança à 60° du côté opposé.

Ma première pensée, en observant ces effets extraordinaires, fut que les vapeurs se déposaient en couches opaques sur les plaques de sel gemme, et que l'air sec, en entrant et vaporisant ces couches, rendait le passage libre à la chaleur de la source.

Mais il suffit d'un moment de réflexion pour faire évanouir cette supposition. En effet, l'enlèvement de la couche de liquide précipité peut, tout au plus, rétablir l'état de choses qui existait avant l'entrée de la vapeur. On peut concevoir qu'il ramène l'aiguille à zéro, mais comment pourrait-il produire une déviation négative? Néanmoins, je démontai le tube, et je soumis les plaques de sel à un examen rigoureux. Je ne vis absolument rien de semblable au dépôt soupçonné. Le sel demeurait parfaitement transparent pendant qu'il était au contact de la vapeur. Comment donc ces effets peuvent-ils s'expliquer?

Nous avons déjà pris connaissance des effets thermiques qui se produisent quand on permet à l'air de s'écouler dans le vide (page 30). Nous savons que l'air est échauffé par son choc contre les parois du récipient. Ne peut-il pas se faire que la chaleur ainsi engendrée, communiquée par l'air aux vapeurs d'alcool et d'éther, et rayonnée par elles contre la pile, soit plus que suffisante pour compenser l'absorption? L'*experimentum crucis* se présente ici de soi-même à l'esprit. Si les effets observés sont dus à l'échauffement de l'air à son entrée au sein du vide imparfait dans lequel la vapeur est répandue, nous devrons obtenir les mêmes effets, lorsque les sources de chaleur

employées auront tout à fait disparu. Nous sommes ainsi amenés à l'examen d'un problème nouveau et à première vue entièrement paradoxal : la détermination du rayonnement et de l'absorption d'un gaz ou d'une vapeur sans aucune source de chaleur en dehors du corps gazeux lui-même.

Etablissons donc notre appareil, et laissons de côté nos deux sources de chaleur. Voici notre tube de verre, fermé à un bout par une plaque de verre, car nous n'avons plus besoin maintenant que la chaleur passe par cette extrémité; et à l'autre bout par une plaque de sel gemme. En face du sel est placée la pile, mise en communication avec son galvanomètre. Quoiqu'il n'y ait plus maintenant de source spéciale de chaleur agissant sur la pile, vous voyez que l'aiguille ne revient pas tout à fait à zéro; en réalité, les murs de cette salle, et les auditeurs assis devant moi, sont autant de sources de chaleur; et pour les neutraliser, pour ramener l'aiguille exactement à zéro, je dois chauffer légèrement la face de la pile qui en a besoin. Cela se fait sans aucune difficulté au moyen d'un cube d'eau tiède, placé à une certaine distance; l'aiguille est maintenant à zéro.

Le vide étant fait dans le tube d'expérience, je fais entrer l'air jusqu'à ce que le tube soit plein; la colonne d'air horizontale qui est à présent dans le tube est échauffée; chaque atome de l'air oscille; et si ces atomes possèdent quelque pouvoir sensible de communiquer leur mouvement à l'éther véhicule de la lumière, chaque atome émettra une série d'ondes qui viendront frapper la face de la pile. Mais vous remarquez à peine quelque mouvement dans le galvanomètre, et vous pouvez en conclure que la quantité de chaleur rayonnée par l'air est excessivement petite. La déviation produite est de 7 degrés.

Mais ces 7 degrés ne sont pas dus réellement à la radiation de l'air. A quoi le sont-ils donc? J'ouvre une des extrémités du tube d'expérience, et j'y introduis un morceau de papier noir qui lui fasse un revêtement intérieur; le papier constitue simplement un anneau qui recouvre la surface intérieure du tube sur une longueur de 12 pouces. Je ferme le tube et je répète la dernière expérience. Le vide a été fait dans le tube et l'air y entre main-

tenant, mais voyez l'aiguille. Elle a déjà parcouru un arc de 70°. Vous avez ici la preuve de l'influence exercée par la doublure de papier; elle est échauffée par l'air, et elle rayonne avec abondance contre la pile. Or *la surface intérieure du tube doit agir de même,* quoique à un degré moindre, et c'est au rayonnement provenant de cette surface, et non de l'air lui-même, que doit être attribué, je pense, la déviation de 7° que nous avons d'abord observée.

Je retire du tube le papier de doublure, et au lieu d'air, j'y fais affluer un courant de protoxyde d'azote : l'aiguille s'élance à 28°, montrant ainsi la supériorité du pouvoir rayonnant de ce gaz. Je fais maintenant jouer les pistons de la machine pneumatique, le gaz qui est dans le tube d'expérience se refroidit, et la pile lui envoie sa chaleur; une déviation de 20° en sens opposé est la conséquence de ce refroidissement.

Au lieu de protoxyde d'azote, je fais entrer du gaz oléfiant dans le tube où le vide est fait. Nous savons déjà que ce gaz est doué à un degré éminent de la faculté de rayonner. Les atomes sont actuellement échauffés, et chacun d'eux exerce son pouvoir rayonnant; l'aiguille parcourt un arc de 67°. Laissons la chaleur se perdre, et l'aiguille revenir à zéro. J'aspire le gaz, et le refroidissement qui en résulte dans l'intérieur du tube produit une déviation de 40° du côté du froid. Nous avons décidément la clef de l'explication des effets énigmatiques observés avec les vapeurs d'alcool et d'éther.

Pour faciliter le langage nous pouvons appeler *échauffement dynamique* l'échauffement du gaz entrant dans le vide; j'appellerai sa radiation *radiation dynamique,* et son absorption, lorsqu'il est refroidi par l'action de la machine pneumatique, *absorption dynamique.* Ces termes compris, le tableau suivant s'explique de lui-même. Il donne pour chaque cas la limite atteinte par l'aiguille à l'entrée du gaz dans le tube d'expérience.

RADIATION DYNAMIQUE DES GAZ

Noms.	Limite de la première impulsion.
	°
Air.	7
Oxygène.	7
Hydrogène.	7
Azote.	7
Oxyde de carbone.	19
Acide carbonique.	21
Protoxyde d'azote.	31
Gaz oléfiant.	63

Nous remarquons que l'ordre des pouvoirs rayonnants, déterminé par ce nouveau moyen, est celui qu'avait déjà donné un mode d'expérience entièrement différent. Il faut avoir présent à l'esprit que la découverte de la radiation dynamique est toute récente, et que les conditions d'une détermination parfaitement exacte ne sont pas encore trouvées ; il est certain néanmoins que le mode d'expérimentation auquel nous avons eu recours est susceptible d'une précision extrême.

Revenons maintenant à nos vapeurs, et en m'occupant d'elles je tâcherai de réaliser à la fois deux effets qui, à première vue, semblent tout à fait incompatibles. Nous avons déjà appris que la surface polie d'un métal émet une radiation très-faible; mais que quand cette même surface est recouverte d'un vernis la radiation devient abondante. Pour communiquer leur mouvement à l'éther les atomes du métal ont besoin d'un intermédiaire, et ils le trouvent dans le vernis. Ils communiquent leur mouvement aux molécules du vernis, et celles-ci sont dans une relation telle avec l'éther lumineux[1] qu'elles peuvent lui communiquer directement leur mouvement. *Or l'on peut vernir une surface métallique avec une couche d'un gaz actif.* J'ai ici une disposition qui me permet de faire passer un mince courant de gaz oléfiant du gazo-

[1] Si nous pouvions changer soit le nom donné au milieu interstellaire, soit le nom donné par les chimistes à divers liquides volatils, il y aurait grand avantage; car il est difficile d'éviter la confusion, quand on donne un même nom à des objets si différents.

mètre G (fig. 94) par le tube fendu *ab* le long de la surface chauffée du cube C. Le rayonnement de C est maintenant neutralisé par celui de C', je fais écouler le gaz le long du cube C; et quoi-

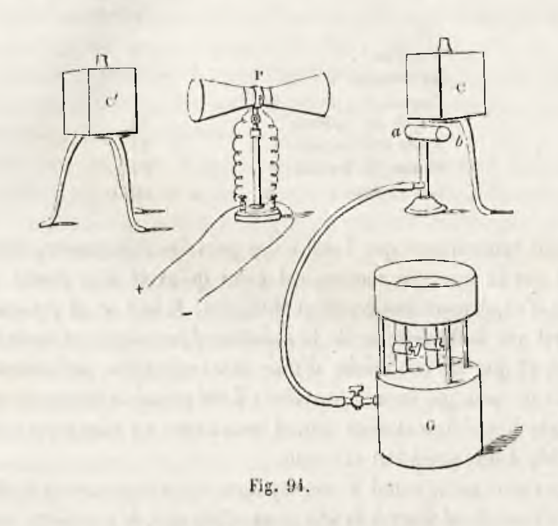


Fig. 94.

que sa surface soit réellement refroidie par le passage du gaz, car le gaz doit s'échauffer au contact du métal, vous voyez que l'effet produit est une augmentation considérable de la radiation : aussitôt que le gaz commence à s'écouler ou à lécher la surface, l'aiguille marche, et atteint une amplitude de 45°.

Nous avons ici verni un métal avec un gaz, mais vernir un corps gazeux avec un autre corps gazeux sera quelque chose de plus original et de plus intéressant encore. Voici une éprouvette contenant de l'éther acétique, substance volatile, et, comme vous le savez, éminemment absorbante. Je fixe l'éprouvette au tube d'expérience, et je fais pénétrer de la vapeur dans le tube, jusqu'à ce que la colonne de mercure baisse d'un demi-pouce. Il y a maintenant dans le tube de la vapeur ayant un demi-pouce de tension. J'ai l'intention d'employer cette vapeur comme vernis, et de prendre le corps simple oxygène au lieu des corps simples or, argent ou

cuivre, pour la substance à laquelle mon vernis de vapeur devra être appliqué. L'aiguille est actuellement à zéro, et je fais entrer l'oxygène sec dans le tube; le gaz s'échauffe dynamiquement, et nous avons vu son impuissance à rayonner sa chaleur; mais voici qu'il arrive en contact avec la vapeur d'éther acétique, et, qu'il communique son mouvement par une action ou choc direct à cette vapeur capable, elle, de transmettre directement le mouvement à la pile. Voyez l'aiguille; la radiation des particules de vapeur lui a fait parcourir un arc de 70°. Je n'ai pas besoin d'insister sur le fait que dans cette expérience la vapeur se trouve avec l'oxygène précisément dans les mêmes relations que le vernis avec le métal dans nos premières expériences.

Attendons un peu; permettons à la vapeur de perdre sa chaleur; c'est par elle que s'épuise la force calorifique engendrée par l'oxygène; l'aiguille est de nouveau à zéro. Je fais agir la machine pneumatique, la vapeur se refroidit dans le tube, et vous voyez maintenant l'aiguille s'élancer presqu'à 45° de l'autre côté du zéro. C'est de cette manière qu'ont été déterminés le rayonnement et l'absorption des vapeurs rapportées dans le tableau suivant; toutefois l'air était, à la place de l'oxygène, la substance employée pour échauffer la vapeur. On a noté, comme précédemment, la limite du premier écart de l'aiguille.

RADIATION ET ABSORPTION DYNAMIQUES DES VAPEURS

	Déviations.	
	Rayonnement	Absorption
	°	°
1. Bisulfure de carbone .	14	6
2. Iodure de méthyle . .	19,5	8
3. Benzol	30	14
4. Iodure d'éthyle. . . .	34	15,5
5. Alcool méthylique. . .	36	
6. Chlorure d'amyle . . .	41	25
7. Amylène.	48	
8. Alcool.	50	27,5
9. Éther sulfurique . . .	64	34
10. Éther formique. . . .	68,5	38
11. Éther acétique.. . . .	70	43

Nous avons employé ici onze espèces différentes de vapeur

comme vernis appliqué à l'air, et nous trouvons que la radiation et l'absorption dynamiques augmentent exactement dans l'ordre établi par les expériences avec des sources extérieures de chaleur. Nous voyons aussi que le rayonnement et l'absorption marchent ensemble, du plus parfait accord, augmentant et diminuant en même temps.

Nous avons souvent fait remarquer combien était faible la quantité de matière mise en jeu dans quelques-unes de ces actions sur la chaleur rayonnante ; et je tiens à décrire une expérience qui fournira un exemple de ce genre plus frappant encore que tous les précédents. L'absorption de la vapeur d'éther boracique, donnée page 348, surpasse celle de toutes les autres substances inscrites dans le même tableau, et l'on doit penser à *priori* que la radiation dynamique lui sera proportionnelle. Je fais le vide dans le tube à expérience aussi parfaitement qu'il est possible, et j'y introduis une quantité de vapeur d'éther boracique suffisante pour faire baisser de un 10ᵉ de pouce, la colonne de mercure. Le baromètre est aujourd'hui à 30 pouces ; d'où il suit que la tension de la vapeur d'éther contenue dans le tube est le 300ᵉ d'une atmosphère.

Je fais entrer de l'air sec dans le tube ; la vapeur est échauffée, et le rayonnement dynamique produit une déviation de 56°.

Je fais jouer le piston de la machine pneumatique jusqu'à réduire ce qui reste d'air dans le tube à la tension de deux 10ᵉˢ de pouce, ou d'un 150ᵉ d'atmosphère. Il reste aussi dans le tube de la vapeur d'éther boracique, et la tension de cette vapeur ne peut être que le 150ᵉ de celle de la vapeur entrée d'abord. J'introduis l'air sec, et je trouve que la radiation dynamique de la vapeur restante est exprimée par une déviation de 42°.

Je fais jouer de nouveau le piston de la machine pneumatique jusqu'à ce que la tension de l'air qu'elle contient soit de deux 10ᵉˢ de pouces et celle de la vapeur d'éther restant dans le tube le 150ᵉ de ce qu'elle était dans la dernière expérience. La radiation dynamique de ce résidu est mesurée par une déviation de 20°.

Deux nouvelles expériences, conduites de la même manière, donnent respectivement des déviations de 14° et de 10°. Deman-

dons-nous maintenant quelle est la tension de la vapeur d'éther boracique à laquelle correspond cette dernière déviation? Le tableau suivant donne la réponse à cette question.

RAYONNEMENT DYNAMIQUE DE L'ÉTHER BORACIQUE

Tension en parties d'une atmosphère.	Déviation.
	°
$\frac{1}{300}$	56
$\frac{1}{150} \times \frac{1}{300} = \frac{1}{45000}$	42
$\frac{1}{150} \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{300} = \frac{1}{6750000}$	20
$\frac{1}{150} \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{300} = \frac{1}{1012500000}$	14
$\frac{1}{150} \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{150} \times \frac{1}{300} = \frac{1}{151875000000}$ . . .	10

L'air lui-même, en échauffant l'intérieur du tube, produit, comme nous l'avons vu, une déviation de 7°; donc la déviation de 10° n'est pas due entièrement à la radiation de la vapeur. Retranchant 7°, il reste 3°. Mais, en laissant de côté la dernière expérience, nous ne pouvons pas douter que la moitié au moins de la déviation de 14° ne soit due à ce qui reste dans le tube de vapeur d'éther boracique; ce reste, nous trouvons, par un calcul rigoureux, qu'il faudrait le multiplier par mille millions pour lui faire acquérir la pression ordinaire de l'air atmosphérique.

Il se présente ici une autre réflexion qui mérite notre examen. Nous avons mesuré la radiation dynamique du gaz oléfiant, en le faisant entrer dans notre tube jusqu'à ce qu'il fût rempli. Quelle était, dans cette expérience, la condition de la colonne chaude rayonnante de gaz oléfiant? Il est évident que les parties de la colonne les plus éloignées de la pile devaient rayonner *à travers le gaz qui était devant elles*, et que cette portion antérieure de la colonne de gaz devait absorber une grande partie des rayons émis par la portion postérieure. Il est même tout à fait certain que si nous faisions notre colonne suffisamment longue, les parties antérieures agiraient comme un écran parfaitement impénétrable à la radiation des parties postérieures. Donc, en retranchant la partie de la colonne gazeuse la plus éloignée de la pile, nous diminuerons seulement d'une quantité très-faible la somme de radiation qui arrive à la pile.

Comparons maintenant la radiation dynamique d'une vapeur avec celle du gaz oléfiant. Dans le cas de la vapeur, nous la prenons à un demi-pouce seulement de tension, d'où il résulte que les molécules rayonnantes de l'éther sont bien plus éloignées les unes des autres que celles du gaz oléfiant, qui a une tension soixante fois plus grande ; et, par conséquent, la radiation des parties postérieures de la colonne de vapeur trouvera une porte relativement très-ouverte pour arriver à la pile. Ces considérations montrent que dans le cas de la vapeur, *une plus grande longueur de tube* prend une part efficace à la radiation que dans le cas du gaz oléfiant. Ceci conduit à la conclusion que si nous raccourcissons le tube, nous diminuerons la radiation d'une quantité plus considérable dans le cas de la vapeur que dans le cas du gaz. Soumettons notre raisonnement à l'épreuve de l'expérience.

Nous avons trouvé que la radiation dynamique des quatre substances suivantes, quand la colonne rayonnante avait 2 pieds 9 pouces de long, était exprimée par les déviations ci-jointes :

	°
Gaz oléfiant	65
Éther sulfurique	64
Éther formique.	68,5
Éther acétique.	70

Le gaz oléfiant donnant ici la radiation dynamique la plus faible.

Des expériences faites, précisément de la même manière, avec un tube de 3 pouces, ou dont la longueur n'est plus que le onzième de ce qu'elle était, ont donné les déviations suivantes :

	°
Gaz oléfiant..	39
Éther sulfurique	11
Éther formique.	12
Éther acétique.	15

L'exactitude de notre raisonnement est donc complétement justifiée. Il est prouvé que dans un long tube, la radiation dynamique de la vapeur surpasse celle du gaz, tandis que dans un

tube court, la radiation dynamique du gaz l'emporte sur celle de la vapeur. Ce résultat prouve, si tant est que la preuve soit nécessaire, que, quoique très-diffusées et éparses dans l'air, les molécules des vapeurs sont réellement les centres de la radiation.

Jusqu'à présent, j'ai omis à dessein toute allusion à la plus importante des vapeurs, pour le monde que nous habitons, la vapeur d'eau. Cette vapeur comme vous le savez, est toujours diffusée ou dissoute dans l'atmosphère. Le jour le plus clair n'en est pas exempt ; au contraire, dans les Alpes, les ciels les plus purs sont souvent les plus traîtres, parce que le bleu du ciel devient plus foncé, à mesure que l'air dissout plus de vapeur d'eau. Il est inutile, par conséquent, de vous rappeler que la vapeur d'eau dont je parle n'est pas quelque chose de visible ; ce n'est ni un brouillard, ni un nuage, ni une brume d'espèce quelconque. Ces brouillards, ces nuages, ces brumes sont formés de vapeur d'eau condensée, tandis que la vapeur véritable à laquelle nous avons affaire est un gaz impalpable et transparent. Elle est répandue partout dans toute l'asmosphère, quoique dans des proportions très-variables avec le lieu et le temps.

Pour prouver l'existence de la vapeur aqueuse dans l'air de cette salle, j'ai placé sur le devant de la table un vase de cuivre, rempli il y a une heure d'un mélange de glace pilée et de sel. La surface du vase était noire alors; elle est blanche maintenant; il est tout couvert de givre produit par la condensation d'abord, par la congélation ensuite de la vapeur d'eau sur sa surface. Je puis enlever en raclant cette matière blanche et la recueillir dans la main. A mesure que j'enlève la vapeur congelée, la surface noire du vase reparaît ; mais voici que j'ai assez de vapeur d'eau glacée pour en faire une boule de neige respectable.

Faisons un pas de plus. Je place cette neige dans un moule, je lui donne devant vous, en la comprimant, la forme d'une coupe de glace, et voici que, sans avoir quitté cette salle, nous avons mis en évidence le travail de formation des glaciers depuis le commencement jusqu'à la fin. Sur la plaque de verre dont je me suis servi pour recouvrir le vase plein du mélange réfrigérant, la vapeur n'est pas congelée, mais elle s'est condensée si abondam-

ment, que, quand je tiens la plaque verticalement, l'eau coule en jet continu.

La quantité de vapeur contenue dans l'air est très-petite. L'oxygène et l'azote forment à eux seuls les quatre-vingt-dix-neuf centièmes et demi de notre atmosphère; sur les cinq autres dixièmes, 45 centièmes sont de la vapeur d'eau; le reste est de l'acide carbonique. Si nous n'étions pas déjà au courant de l'action sensible exercée sur la chaleur rayonnante par des quantités de matière presque infiniment petites, nous désespérerions de pouvoir jamais établir que la vapeur d'eau de notre atmosphère exerce une action appréciable. En effet, j'ai longtemps négligé de tenir compte de cette action, et j'ai eu de la peine à accepter ce premier résultat de mes recherches que l'action de la vapeur d'eau de notre laboratoire est égale à quinze fois celle de l'air dans lequel elle est répandue. Ce n'est là cependant, en aucune manière, le rapport véritable entre l'action de la vapeur d'eau et celle de l'air sec.

Je vais faire devant vous une expérience qui rendra clair ce que je veux dire. Vous voyez que j'ai repris la disposition première de l'appareil, celle qui est indiquée dans la planche I, avec un tube de laiton et deux sources de chaleur agissant sur les faces opposées de la pile. Je fais le vide dans le tube d'expérience, et je répète aujourd'hui avec de l'air sec l'expérience que j'ai faite au commencement de la dernière leçon. L'aiguille ne se meut pas sensiblement. Si vous étiez tout près, vous pourriez, comme je l'ai déjà constaté, observer un déplacement d'environ un degré. Probablement que si nous pouvions purifier ou dessécher parfaitement l'air sur lequel nous opérons, son action serait encore moindre. Je pompe cet air et je fais entrer directement dans le tube d'expérience l'air de cette salle, sans le faire passer à travers l'appareil dessiccateur. L'aiguille, comme vous le voyez, marche à mesure que l'air entre, et la déviation maximum est de 48°. L'aiguille continuera à indiquer ce chiffre, aussi longtemps que les sources de chaleur demeureront constantes, et aussi longtemps que l'air restera dans le tube. Ces 48° correspondent à une absorption de 72; c'est-à-dire que la vapeur d'eau contenue

aujourd'hui dans l'atmosphère de cette salle exerce sur la chaleur rayonnante une action 72 fois plus grande que celle de l'air lui-même.

Ce résultat s'obtient avec une facilité parfaite, mais non sans qu'on prenne les précautions convenables. En comparant l'air sec avec l'air humide, il est très-essentiel que tous les deux soient bien purs. Vous pourriez opérer pendant des mois entiers avec un appareil dessiccateur imparfait, sans arriver à obtenir un air sur lequel vous constatiez cette absence presque totale d'action sur la chaleur rayonnante. Une quantité de matière organique trop petite pour être sensible à la vue suffit à rendre tout à coup l'action de l'air cinquante fois plus grande qu'elle n'est. Initiés aux effets que peut produire dans certains cas une quantité de matière presque infiniment petite, vous êtes mieux préparés à accueillir des faits de ce genre, que je ne l'étais quand, pour la première fois, ils se sont imposés à mon attention. Mais soyons bien soigneux et bien circonspects dans nos recherches. Le résultat expérimental que nous venons d'obtenir aura, s'il est vrai, une influence si importante dans la science de la météorologie, qu'avant de l'admettre, force est de le soumettre à l'examen le plus rigoureux. Avant tout, regardez ce morceau de sel gemme apporté ici de la chambre voisine, où il est resté pendant quelque temps près d'un bassin, sans contact toutefois avec des moiteurs visibles. Ce sel est mouillé ; c'est une substance hygrométrique qui condense abondamment à sa surface les moiteurs environnantes. Voici une plaque polie de cette substance tout à fait sèche ; je souffle dessus, et à l'instant son affinité pour l'eau fait que la vapeur de mon haleine se condense et forme à sa surface une couche présentant les belles couleurs des plaques minces. Cela posé, nous savons, par le tableau de la page 292, combien une solution de sel gemme est opaque aux rayons calorifiques, et nous sommes ainsi conduits à nous demander si, dans l'expérience précédente avec de l'air non desséché, nous n'avons pas réellement mesuré l'action d'une couche mince d'une semblable solution déposée à la surface de nos plaques de sel, au lieu de la simple action de la vapeur d'eau de l'air.

Si vous opérez sans précaution, et, surtout, si votre intention est réellement de mouiller vos plaques de sel, il ne vous sera pas difficile d'obtenir le dépôt d'humidité. C'est un point sur lequel tout expérimentateur compétent est bientôt fixé; mais l'essence d'une bonne expérimentation consiste dans l'exclusion des circonstances qui rendraient obscures et complexes les questions claires et simples que vous voulez adresser à la nature. Le premier moyen d'écarter le doute qui se présente ici est d'examiner nos plaques de sel ; si les expériences ont été convenablement conduites, on ne doit trouver à leur surface aucune trace d'humidité. Pour rendre plus certain le succès de l'expérience, je vais changer légèrement la disposition des appareils. Jusqu'ici nous avons laissé la pile thermo-électrique et ses deux réflecteurs entièrement *en dehors* du tube d'expérience. J'enlève maintenant le réflecteur de la pile, et dévissant cette plaque terminale de sel gemme, j'enfonce le réflecteur dans le cylindre. Ce réflecteur conique, creux, fait ressort à sa base *ab* (fig. 95),

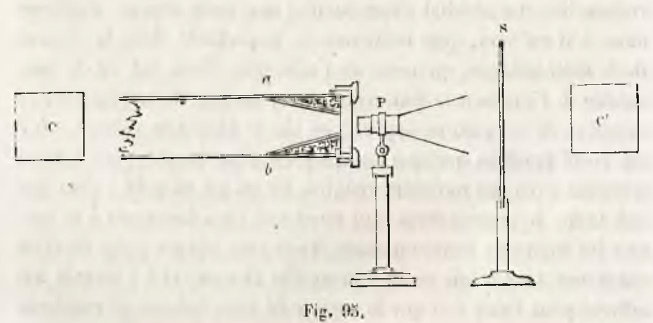


Fig. 95.

de sorte qu'il s'applique parfaitement par sa propre pression contre la surface intérieure du cylindre (c'est notre première disposition, avec la seule différence que l'un des réflecteurs de la pile P est maintenant dans l'intérieur du tube). L'espace entre la surface extérieure du réflecteur et la surface intérieure du tube est rempli de fragments de chlorure de calcium fondu, qu'un petit écran de toile métallique empêche de tomber. Je

revisse maintenant ma plaque de sel, contre la surface intérieure de laquelle vient s'appliquer le petit bout du réflecteur; je rapproche la face de la pile tout près de la plaque, sans cependant les mettre en contact, et la disposition est complète.

Il faut remarquer, en premier lieu, que la plaque de sel la plus rapprochée de la source C n'est jamais humide, à moins qu'on ne le fasse exprès. Sa proximité de la source fait qu'elle est le passage d'un flux de chaleur assez puissant pour chasser de sa surface toute trace d'humidité. La plaque éloignée de C était seule en danger; mais ses bords sont actuellement maintenus parfaitement secs par le chlorure de calcium; l'air humide ne peut plus du tout les atteindre; et quant à sa partie centrale d'un pouce carré environ de superficie, c'est sur elle que *nous faisons converger notre radiation tout entière*. Nous pouvions conclure *à priori* qu'il était tout à fait impossible qu'une couche d'humidité pût s'y déposer; et cette conclusion a été pleinement justifiée par le fait. J'essaye, comme précédemment, l'air sec, puis l'air non desséché de cette salle, et je trouve, comme d'abord, que le second est soixante-dix fois plus actif que le premier. L'aiguille est actuellement déviée par l'absorption de l'air non desséché; laissant cet air dans le tube, je dévisse ma plaque de sel, et j'examine sa surface. Pour mieux voir, j'ai recours à la loupe, en prenant soin, toutefois, que mon haleine ne frappe pas la plaque. Elle était parfaitement polie quand elle a été fixée au tube; elle est encore parfaitement polie. Du verre ou du cristal de roche ne montrerait pas une surface plus exempte de toute apparence d'humidité. J'appuie contre mon doigt le linge sec de mon mouchoir, et je le passe en frottant sur la surface de la plaque; il ne retient rien; il ne s'est pas fait le plus léger dépôt d'humidité. Cette expérience réfute complétement l'hypothèse que les effets observés sont dus à une couche d'eau salée et non à de la vapeur aqueuse. Mais le doute peut subsister encore; et quoique nous soyons incapables de découvrir la couche d'humidité, elle peut cependant exister. Pour écarter jusqu'à l'ombre du doute, je détache le tube d'expérience de la chambre antérieure, et j'enlève les deux pla-

une augmentation d'opacité, la déviation finale n'est plus que de 15°.

Nous avons donc ici en substance le résultat que nous avons obtenu en bouchant notre tube avec des plaques de sel gemme; d'où il suit que l'action primitivement observée ne saurait être attribuée à une couche hypothétique d'humidité déposée à la surface des plaques. Et, qu'on le remarque bien, il n'y a dans ces expériences, quand elles sont convenablement conduites, ni le plus léger caprice, ni hésitation, ni incertitudes. Elles ont été exécutées dans des temps différents et dans des saisons différentes; le tube a été démonté et remonté; les précautions suggérées par des hommes éminents qui ont vu les expériences, et qui avaient pour but un contrôle plus sévère des phénomènes ont été mises en pratique, sans que jamais on ait observé la plus petite exception aux faits que nous venons d'énoncer. L'entrée de chaque espèce d'air est invariablement accompagnée de son action caractéristique; l'aiguille obéit fidèlement à leur action; en un mot, aucune expérience faite jusqu'ici, avec des corps solides et liquides, n'a été plus constante et plus certaine dans ses résultats que les expériences précédentes sur l'air sec et sur l'air humide.

Nous pouvons estimer aisément la proportion de la radiation totale absorbée par l'air ordinaire entre les points C et D.

En dressant cet écran de ferblanc entre le cylindre à expérience et la pile, j'intercepte une des sources de chaleur. La déviation produite par l'autre source indique la *radiation totale*.

Cette radiation est égale à environ 1200 fois l'unité adoptée dans ces leçons, ou à la quantité de chaleur nécessaire pour mouvoir l'aiguille de 0° à 1°. La déviation de 45° correspond à 50 unités, donc, sur 1 200 unités, il y en a eu 50 d'absorbées par l'air humide, et la proportion suivante donnera l'absorption en centièmes;

$$1200 : 100 :: 50 : 4,2$$

c'est-à-dire que la vapeur d'eau renfermée dans l'espace compris entre C et D a déterminé une absorption égale à 4,2 pour 100. Si l'air avait *parfaitement saturé*, l'absorption aurait été de plus de 5 pour 100.

Cette absorption a lieu nonobstant le *tamisage* partiel de la chaleur dans son passage de la source à C, et de D à la pile. En outre, l'air humide n'était, probablement, remplacé qu'en partie par l'air sec. Dans d'autres expériences j'ai trouvé, avec un tube long de 4 pieds et poli intérieurement, que la vapeur atmosphérique, un jour de sécheresse moyenne, absorbait plus de 6 pour 100 du rayonnement de notre source. En considérant la terre comme une source de chaleur, on pourra admettre comme certain que 10 *au moins pour* 100 de la chaleur qu'elle tend à rayonner dans l'espace *sont interceptés par les dix premiers pieds d'air humide qui entourent sa surface*[1]. Ce seul fait indique assez l'énorme influence que cette propriété nouvellement constatée de la vapeur d'eau doit avoir dans les phénomènes de la météorologie.

Mais nous n'avons pas encore répondu à toutes les objections. On m'a fait entendre que l'air de notre laboratoire devait être impur; et l'on a signalé les particules de charbon suspendues dans l'atmosphère de Londres comme la cause possible de l'absorption attribuée à la vapeur d'eau.

Voici ma réponse : 1° Les résultats ont été obtenus avec des appareils installés hors du laboratoire, et au sein de cette salle; 2° On a apporté dans des vases imperméables de l'air puisé dans les localités suivantes : Hyde-Park, Primrose-Hill, Hampstead-Heath, Epsom-Downs (près le *Grand-Strand*); un champ près de Newport (île de Wight); Sainte-Catherine-Down (île de Wight); plage de la mer, près de Black-Gang-Chine, etc., etc. *La vapeur d'eau de l'air de toutes ces localités, examinée de la manière indiquée, exerçait une absorption égale à soixante-dix fois celle de l'air dans lequel cette vapeur était répandue.*

J'ai fait de nouveau l'expérience de cette manière. L'air du laboratoire a été desséché et purifié jusqu'à ce que son absorption tombât au-dessous de l'unité ; cet air purifié a été alors conduit à travers un tube en U, rempli de fragments de verre parfaite-

[1] J'ai des raisons de croire que, dans quelques circonstances, l'absorption surpasse considérablement cette proportion.

ment lavés et mouillés avec de l'eau distillée. Sa neutralité, quand il était sec, montrait qu'il avait été dépouillé de toute substance étrangère ; et en passant par le tube en U, il ne pouvait prendre que de la pure vapeur d'eau. Or, la vapeur d'eau ainsi entraînée dans le tube à expérience produisait une action quatre-vingt-dix fois plus grande que celle de l'air qui l'entraînait.

Mais là ne s'arrêtent pas encore les exigences d'une critique loyale et philosophique. Le tube avec lequel ces expériences ont été faites est poli à l'intérieur, et on a émis le soupçon que la vapeur de l'air humide pouvait entrer dans le tube, se déposer à sa surface intérieure, et diminuer ainsi son pouvoir réflecteur, en produisant un effet équivalent à une absorption. Mais pourquoi je le demande, ce dépôt d'humidité aurait-il lieu? Dans plusieurs des jours où ces expériences ont été faites l'air était au moins à 25 pour 100 au-dessous de son point de saturation. On peut difficilement admettre qu'un air semblable ait déposé son humidité sur une surface métallique, *contre laquelle*, *en outre*, *venaient frapper en même temps les rayons de notre source de chaleur*. Le simple énoncé de l'objection lui enlève tout son poids. De plus, l'absorption s'exerce, alors même que la tension de l'air introduit dans le tube n'est qu'une petite fraction d'atmosphère, et elle s'exerce proportionnellement à la quantité de l'air présent. Ceci est prouvé par le tableau suivant, qui donne l'absorption, par l'air humide, à des tensions qui ont varié depuis 5 jusqu'à 30 pouces de mercure.

AIR HUMIDE.

Tension en pouces.	Absorption Observée.	Absorption Calculée.
5	16	16
10	32	32
15	49	48
20	64	64
25	82	80
30	98	96

La troisième colonne du tableau est calculée dans la supposition que l'absorption est proportionnelle à la quantité de vapeur

présente dans le tube, et l'accord des résultats calculés et observés fait voir que la proportionnalité a réellement lieu dans les limites de l'expérience. Comment supposer que des effets aussi réguliers que ceux-ci, s'accordant si complétement avec les effets obtenus sur de petites quantités d'autres vapeurs, et même sur de petites quantités de gaz permanents, puissent être dus à la condensation de la vapeur sur la surface intérieure du tube. En outre, quand la tension de l'air était de cinq pouces, la quantité de vapeur présente n'était pas le sixième de ce qui est nécessaire pour la saturation complète. Le jour le plus sec n'approche pas de cette sécheresse. Dans ces circonstances, évidemment, la condensation est impossible, surtout une condensation qui, par son action sur la surface réfléchissante intérieure, vienne détruire des quantités de chaleur exactement proportionnelles aux quantités de matière présente.

Toutefois, dans mon désir de rendre cette importante question tout à fait indépendante du raisonnement ou de la discussion, quelque solides que pussent être ce raisonnement et cette discussion, j'ai résolu d'abandonner non-seulement les plaques de sel gemme, mais le tube d'expérience lui-même, et de

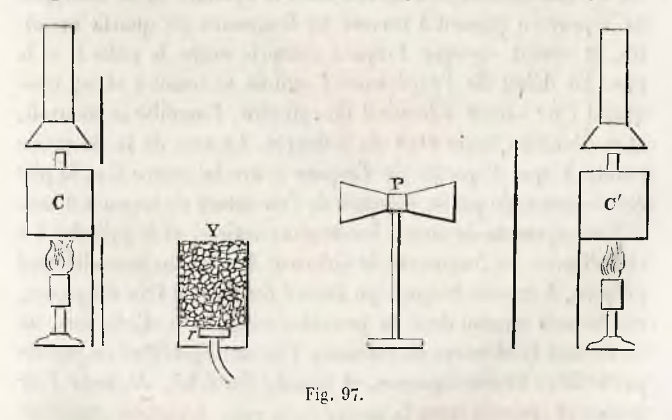


Fig. 97.

déplacer l'air libre sec par l'air libre humide, et réciproquement. J'ai adopté dans ce but les dispositions suivantes : — C (fig. 97),

un cube d'eau bouillante est la source de chaleur. V est un cylindre creux en laiton, dressé verticalement, large de 3,5 pouces, haut de 7,5. P est la pile thermo-électrique, et C' un cube compensateur; entre ce cube et la pile se trouve l'écran qui sert à régler la quantité de radiation reçue par la surface postérieure de la pile. Cet ensemble d'appareils était environné d'une cloison en planches, divisée intérieurement, par des feuilles de fer-blanc, en compartiments remplis de rognures de papier ou de crin non tassés. Ces précautions, dont le temps a révélé successivement la nécessité, ont pour but d'empêcher la formation de courants d'air locaux, et aussi de se mettre à l'abri de l'action irrégulière de l'air extérieur. L'effet à mesurer ici est très-petit, et voilà pourquoi il faut à tout prix écarter jusqu'à l'ombre de ce qui pourrait le troubler, ou l'empêcher de se produire dans toute sa simplicité et avec la clarté désirable.

Un bec de gaz cylindrique *r*, placé au fond du cylindre Y, communique par un tube avec un sac de caoutchouc contenant de l'air. Le cylindre Y est plein de fragments de cristal de roche, mouillés avec de l'eau distillée. Lorsqu'on pressait doucement sur le sac de caoutchouc, l'air entrait dans le cylindre Y, se chargeait de vapeur en passant à travers les fragments de quartz mouillés, et venait occuper l'espace compris entre le cube C et la pile. Au début de l'expérience l'aiguille se tenait à zéro; mais quand l'air saturé s'écoulait du cylindre, l'aiguille se mouvait, et sa déviation finale était de 5 degrés. Le sens de la déviation montrait que l'opacité de l'espace entre la source C et la pile était augmentée par la présence de l'air saturé de vapeurs d'eau.

Les fragments de quartz furent alors retirés, et le cylindre fut rempli avec des fragments de chlorure de calcium nouvellement préparé, à travers lesquels on forçait doucement l'air de passer, exactement comme dans la première expérience. Cette fois, en traversant le chlorure de calcium, l'air se dépouillait en grande partie de sa vapeur aqueuse, et venait, desséché, déplacer l'air ordinaire compris entre la source et la pile. L'aiguille marchait aussitôt, et atteignait une déviation définitive de 10 degrés, dont la direction indiquait que la présence de l'air sec avait accru la

transparence de l'espace interposé. En faisant en temps opportun les émissions d'air desséché, on pouvait porter de 10 à 15 et 20 degrés la déviation de l'aiguille. Souvent répétée, l'expérience a toujours donné le même résultat; l'air sec augmentait toujours la transparence de l'espace entre la source et la pile. Ce ne sont donc plus seulement les plaques de sel gemme qui ont disparu, le tube d'expérience a lui-même été abandonné, sans que les conclusions relatives à l'action de la vapeur d'eau sur la chaleur rayonnante aient cessé d'être parfaitement conformes à ce qu'elles avaient été d'abord.

Si ce sujet était moins important, je ne m'y serais pas arrêté aussi longtemps. Mais j'ai cru qu'il était de mon devoir d'écarter toutes les objections, afin que les météorologistes puissent faire en toute sécurité l'application des données de l'expérience. Ces applications devront être innombrables ; et je regrette sincèrement de n'être pas assez initié aux secrets de cette belle science pour pouvoir faire moi-même les principales parmi ces applications si fécondes. Permettez-moi cependant de signaler ceux des points présents à mon esprit avec lesquels les faits que nous venons d'établir sont liés plus ou moins intimement. Et d'abord il importe de faire remarquer que la vapeur qui absorbe si avidement la chaleur, doit aussi la rayonner abondamment. J'imagine que ce second fait doit jouer un très-grand rôle sous les tropiques. Nous savons que le soleil fait monter de l'océan qui entoure l'équateur d'énormes quantités de vapeur, et que, immédiatement, dans la région des calmes, alors que le soleil darde encore ses rayons presqu'à plomb, la pluie, due à la condensation de cette vapeur, tombe à torrents. Jusqu'à présent, on attribuait ces pluies au refroidissement qui accompagne l'expansion de l'air ascendant, et il n'est pas douteux que ce refroidissement entre comme cause réelle, et comme cause agissant proportionnellement à son intensité, dans l'effet de condensation des vapeurs tropicales. Mais je ne puis me défendre de penser que la radiation de ces mêmes vapeurs exerce aussi à son tour une influence considérable. Imaginez-vous une colonne d'air saturé s'élevant de l'Océan équatorial. Pendant un certain temps, ces

vapeurs, mêlées à l'atmosphère, restent entourées d'air saturé. Elles rayonnent, mais leur radiation se fait de vapeur à vapeur; et la vapeur est un écran particulièrement opaque pour les radiations issues de cette même vapeur. Donc, pendant un certain temps, la radiation de la colonne ascendante se trouvera empêchée; ou, si l'on admet que cette colonne rayonne, sa radiation lui sera rendue en grande partie par la vapeur environnante; or, dans ces conditions, la condensation en eau ne pourrait pas se produire. Mais la quantité de vapeur mêlée à l'atmosphère diminue rapidement à mesure qu'elle s'élève; car il est prouvé par les observations de Hooker, Strachy et Welsh, que la pression de la vapeur contenue dans l'air diminue beaucoup plus rapidement que celle de l'air, quand la hauteur augmente. Notre colonne d'air aura donc bientôt dépassé l'écran d'air saturé qui la protégeait, et qui, durant la première partie de son ascension, s'étendait au-dessus d'elle. Elle est maintenant en présence de l'espace vide, auquel elle cède sa chaleur sans obstacle ou sans compensation. Comment ne pas attribuer en partie à cette perte de chaleur la condensation de la vapeur et sa chute torrentielle en eau qui inonde la terre.

Le même raisonnement s'étend à la formation des *cumulus* sous nos latitudes; ils sont les sommets de colonnes de vapeur qui s'élèvent de la surface de la terre, et se précipitent aussitôt qu'elles atteignent une certaine hauteur. En réalité, le nuage visible forme le chapiteau d'une colonne invisible d'air saturé. Le sommet d'une semblable colonne, élevé au-dessus de l'écran saturé plus bas qui s'appuie sur la terre, en rapport immédiat avec l'espace, doit se refroidir par le rayonnement; et nous ne devons pas chercher ailleurs que dans cette action la cause physique de la formation des nuages.

Les montagnes agissent comme condenseurs de la vapeur d'eau, mais de quelle manière? En partie, sans doute, par le froid de leur masse, froid qu'elles doivent à leur élévation; mais aussi parce qu'au-dessus d'elles il n'y a plus d'écran d'air saturé d'une densité suffisante pour arrêter leur chaleur; cette chaleur, par conséquent, se perd dans l'espace, sans compensation.

Quand le soleil a disparu, cette perte se reconnaît à l'abaissement rapide et considérable du thermomètre, abaissement dû non au rayonnement de l'air, mais au rayonnement de la terre, ou du thermomètre lui-même. Aussi la différence entre un thermomètre qui, convenablement abrité, donne la température vraie de l'air de la nuit, et le thermomètre qu'on laisse rayonner librement vers l'espace, doit être plus grande à des hauteurs considérables que dans des régions plus basses. Cette conclusion est complétement vérifiée par l'observation. Sur le grand plateau du mont Blanc, par exemple, MM. Martins et Bravais ont trouvé que la différence entre deux thermomètres placés dans les conditions que nous venons de dire était de 24° Fahr.., tandis qu'à Chamounix la différence n'était que de 10°.

Mais les montagnes agissent encore comme condenseurs en faisant monter les courants d'air humide, et déterminant leur dilatation ; le refroidissement ainsi produit a la même cause que celui qui accompagne l'ascension directe d'une colonne d'air chaud dans l'atmosphère; l'air en s'élevant fait un travail, et il perd de sa chaleur une quantité proportionnelle au travail accompli. Mais en outre de ces deux causes, je pense qu'il faut prendre en sérieuse considération le pouvoir rayonnant de l'air humide ainsi soulevé. Il cesse bientôt d'être abrité par la couche d'air saturé en contact avec le sol ; et, par conséquent, rayonnant alors librement sa chaleur dans l'espace, il opère lui-même sa propre condensation. Il me semble qu'on ne peut plus douter du rôle très-actif que l'énergie extraordinaire de l'eau considérée comme corps rayonnant, *dans tous ses états d'agrégation*, doit jouer dans les condensations incessantes qui ont lieu dans la région des montagnes. A l'état de vapeur l'eau disperse sa chaleur dans l'espace et provoque sa condensation ; à l'état liquide elle disperse sa chaleur dans l'espace et provoque sa congélation ; à l'état de neige elle disperse sa chaleur dans l'espace et communique aux surfaces sur lesquelles elle tombe une puissance de condensation qu'elles n'auraient pas sans elle. Des propriétés si nombreuses et si merveilleuses de l'eau, la moins importante n'est pas le pou-

voir extraordinaire qu'elle possède de céder son mouvement calorifique à l'éther interstellaire.

Si l'on enlevait à l'air qui recouvre la terre, la vapeur d'eau qu'il contient; il se ferait à la surface du sol une déperdition de chaleur semblable à celle qui a lieu à de grandes hauteurs; car l'air, en lui-même, se comporte pratiquement comme le vide, relativement à la transmission de la chaleur rayonnante. Le coucher du soleil, pour une région dont l'atmosphère serait absolument sèche, serait suivi d'un refroidissement rapide.

La lune, aussi, deviendrait absolument inhabitable pour des êtres semblables à nous par la seule absence de la vapeur d'eau.

Avec le rayonnement extérieur vers l'espace, sans la vapeur d'eau pour le suspendre, la différence entre les maxima et les minima mensuels de température deviendrait énorme. Les hivers du Thibet sont presque insupportables pour la même raison. Nous avons une preuve frappante de la basse température de l'Asie dans ce fait que les lignes isothermes venues du nord y descendent extrêmement bas. Humboldt a étudié plus particulièrement la puissance frigorifique des parties centrales de ce continent; il a réfuté l'idée qu'on pouvait peut-être l'expliquer par sa grande élévation, en faisant remarquer qu'il est dans ces régions de vastes étendues de pays peu élevées au-dessus du niveau de la mer, et dont, cependant, la température est excessivement basse. Dans l'ignorance de l'influence que nous étudions maintenant, Humboldt n'a pas pu tenir compte de l'une des sources les plus importantes du froid qu'il cherchait à expliquer. La seule absence du soleil pendant la nuit produit un refroidissement considérable partout où l'air est sec. La suppression, pendant une seule nuit d'été, de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère qui couvre l'Angleterre, serait accompagnée de la destruction de toutes les plantes que la gelée fait périr. Dans le Sahara, où *le sol est de feu et le vent de flamme*, le froid de la nuit est souvent très-pénible à supporter. On voit, dans cette contrée si chaude, de la glace se former pendant la nuit. En Australie aussi, l'excursion diurne du thermomètre est très-grande; elle atteint ordinairement de 40 à 50 degrés. On peut, en un mot, prédire

à coup sûr que partout où l'air sera sec, l'échelle des températures sera très-considérable. Une grande transparence pour la lumière est parfaitement compatible avec une grande opacité pour la chaleur; l'atmosphère peut être chargée de vapeur d'eau sous un ciel d'un bleu foncé, et s'il en est ainsi, la radiation terrestre serait interceptée malgré la *transparence* parfaite de l'air.

Ce qui précède nous conduit à une explication facile d'un fait qui embarrassait évidemment sir John Leslie. Ce célèbre expérimentateur avait construit un instrument appelé par lui *æthrioscope*, et qui devait servir à déterminer la radiation de la terre vers le ciel. Il consistait en deux boules de verre réunies par un tube de verre vertical, si étroit qu'une petite colonne de liquide restait suspendue dans le tube par sa simple adhérence. La boule inférieure D (fig. 98) était protégée par une enveloppe métallique et donnait la température de l'air ; la boule supérieure B était noircie et entourée d'une coupe métallique C, qui la protégeait contre le rayonnement terrestre.

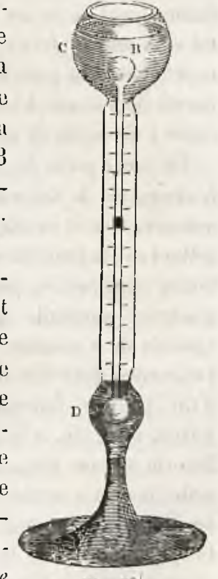


Fig. 98.

« Cet instrument, » dit l'inventeur, « exposé à l'air libre dans un temps clair, doit en tout temps, aussi bien durant le jour que durant la nuit, indiquer une impression de froid tombant des régions supérieures de l'atmosphère. La sensibilité de l'instrument est très-frappante, car la liqueur baisse et monte incessamment dans le tube à chaque nuage qui passe. Mais la cause de ses variations n'est pas toujours aussi facile à saisir. Sous un beau ciel bleu, l'*æthrioscope* indiquera quelquefois un froid de 50 degrés millésimaux, tandis qu'une autre fois, alors qu'en *apparence le jour est également clair*, l'instrument marque à peine 30°. » Ces anomalies sont simplement dues à la différence entre

les quantités de vapeur d'eau présentes dans l'atmosphère. Et, de fait, Leslie les rattache lui-même à l'influence de la vapeur d'eau quand il dit : « La pression de l'humidité hygrométrique dans l'air affecte probablement l'instrument. » Ce n'est pas toutefois la « *pression* » qui agit, c'est la présence de la vapeur invisible qui empêche la radiation de l'æthrioscope, tandis que son absence ouvre la porte par laquelle cette radiation s'échappe librement dans l'espace. Au point de vue des radiations terrestres, la définition d'un *jour clair* est encore à donner. Il est manifeste, par exemple, que dans les expériences avec le pyrhéliomètre [1], deux jours d'égale transparence pour la vue peuvent donner des résultats entièrement différents. Ce qui précède nous donne aussi la raison de ce fait que la radiation de l'héliomètre est souvent empêchée, quoiqu'on n'aperçoive aucun nuage. Si cependant nous parvenions à rendre visibles les principes constituants de l'atmosphère, la vapeur d'eau y comprise, cette anomalie s'expliquerait sans peine aucune.

Un autre point intéressant, qui rentre dans le sujet que nous traitons, est la théorie du *serein* de Melloni. « La plupart des auteurs, » écrit ce physicien éminent, « attribuent au froid résultant du rayonnement de l'air la pluie excessivement fine qui tombe quelquefois par un temps clair pendant la belle saison, quelques moments après le coucher du soleil. » « Mais, » ajoute-t-il, « comme aucun fait n'a encore révélé directement l'existence pour les fluides élastiques limpides et transparents d'un pouvoir émissif appréciable, il me semble plus conforme, etc., etc. » Si la difficulté soulevée par Melloni contre la théorie admise du serein était la seule qu'on pût lui opposer, cette théorie resterait debout ; car il est maintenant prouvé que les fluides élastiques possèdent le pouvoir de rayonner que l'explication reçue leur attribue. Cependant, ce n'est pas au rayonnement de l'*air* qu'il faut attribuer le refroidissement dont il s'agit, mais bien au rayonnement de la vapeur d'eau elle-même, dont la condensation produit le *serein*.

[1] L'instrument est décrit dans la leçon XII.

Permettez-moi d'ajouter cette remarque que, autant que je puis en juger à présent, la vapeur d'eau et l'eau liquide absorbent la même classe de rayons; c'est une autre manière d'établir que la couleur de l'eau pure est aussi la couleur de sa vapeur. Ce serait donc à la vapeur d'eau que l'atmosphère doit d'être un milieu de couleur bleue. Il y a longtemps, je crois, qu'on a remarqué que le bleu du firmament et des montagnes lointaines de l'horizon augmentait avec la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Or, la substance qui modifie le *ton* d'une couleur doit être en même temps une source ou cause de couleur. Mais je ne veux pas m'aventurer à présent à rechercher si l'azur du ciel, la question la plus difficile de la météorologie, doit être réellement expliqué de cette manière.

NOTE

La crainte d'être entraîné trop loin de mon sujet me fait renoncer à toute recherche de la cause de la polarisation atmosphérique. Je puis néanmoins remarquer que j'ai démontré expérimentalement, dans mes leçons, la polarisation de la chaleur, en me servant des piles de mica, avec lesquelles M. le professeur, aujourd'hui M. le principal J. D. Forbes, a le premier réussi à établir la réalité de cette polarisation.

Pour les recherches sur le rayonnement et l'absorption de la chaleur, je me fais un plaisir de signaler les services empressés et intelligents qui m'ont été rendus par M. Becker, de la maison Elliot, 30, West-Strand.

Il a construit, pour ce genre d'expériences, un appareil relativement très-peu cher. Si l'on se borne à un examen qualitatif, sans aspirer à des déterminations quantitatives, deux cubes d'eau chaude, un tube ouvert en fer-blanc, une pile thermo-électrique et un galvanomètre, dont l'aiguille est aimantée avec les précautions décrites dans l'appendice à la première leçon, suffiront à démontrer l'action des gaz et des vapeurs les plus efficaces. Un courant d'air, sortant d'un soufflet ordinaire, entraînera la vapeur dans le tube.

APPENDICE A LA LEÇON XI

EXTRAIT D'UN MÉMOIRE PUBLIÉ DANS LES « TRANSACTIONS PHILOSOPHIQUES POUR 1862 » SUR L'ABSORPTION ET LE RAYONNENENT DE LA CHALEUR PAR LES SUBSTANCES GAZEUZES

« J'étais engagé dans des recherches sur la vapeur d'eau, quand mes autres obligations me forcèrent à les suspendre pour un temps. Je crois cependant pouvoir dire en toute sûreté que non-seulement l'action de la vapeur d'eau sur la chaleur rayonnante est mesurable, mais que *l'on peut faire servir cette action à mesurer l'humidité atmosphérique, le tube employé dans mes expériences étant ainsi converti en un hygromètre d'une délicatesse supérieure.* Malheureusement, comme dans d'autres cas indiqués dans ce mémoire, je n'ai pu donner à ce sujet le développement que j'aurais désiré; mais les résultats que je suis en état de rappeler n'en sont pas moins intéressants.

« Dans un grand nombre d'occasions j'ai comparé l'air arrivé directement de mon laboratoire dans le tube d'expérience avec le même air que j'avais fait passer à travers l'appareil dessiccateur. En prenant pour unité l'action de l'air sec, ou, du moins, en admettant que cette action variable (car la température de ma source change elle-même d'un jour à l'autre), s'écarte peu, dans un sens ou dans l'autre, d'une unité fixe, on a observé les absorptions produites les jours suivants par l'air non desséché du laboratoire.

25 octobre......	65	1er novembre...	50
24 —	62	4 — ...	58
29 —	65	8 — ...	49
51 —	56	12 — ...	62

« Près des neuf dixièmes des effets indiqués ci-dessus étaient dus à

la vapeur d'eau; laquelle, par conséquent, dans quelques circonstances, *exerçait une action environ soixante fois plus grande que l'air dans lequel elle était répandue.*

« Les expériences que j'ai faites sur la vapeur d'eau ont été très-nombreuses et très-variées. Arrivant à des résultats différents de ceux qu'a trouvés M. Magnus, je n'ai épargné aucune peine pour me prémunir contre toute erreur. J'ai expérimenté avec de l'air rendu humide de différentes manières ; quelquefois en faisant monter à travers l'eau de petites bulles d'air; quelquefois, en le divisant, en le faisant passer à travers les pores d'un jonc ordinaire plongé dans l'eau. Entre l'appareil dessiccateur et le tube d'expérience je plaçais des tubes contenant des fragments de verre mouillés avec de l'eau, et je faisais passer l'air sur eux. Dans tous ces cas les effets observés étaient considérables; l'absorption était habituellement plus de quatre-vingts fois celle de l'air desséché. Quand, avant d'entrer dans le tube d'expérience, l'air sec avait passé sur des fragments de verre non mouillés, mais simplement exposés à l'air du laboratoire, l'absorption était quinze fois celle de l'air desséché. On mit dans un tube de verre un rouleau de papier buvard, pris des mains du garçon du laboratoire, et qui avait toute l'apparence d'un papier parfaitement sec, et on fit passer de l'air sec entre ses feuilles. L'expérience, répétée cinq fois successivement avec le même papier, donna les absorptions suivantes :

	Absorption.
N° 1.	72
N° 2.	62
N° 3.	62
N° 4.	47
N° 5.	47

« De fait, la vapeur d'eau se comporta exactement comme devait le faire la vapeur d'un liquide que Melloni avait trouvé être l'absorbant le plus puissant de tous ceux examinés par lui.

« Chaque matin, en commençant mes expériences, j'avais un exemple intéressant du pouvoir qu'a le verre de se couvrir à sa surface d'une couche d'humidité. Supposez le tube monté, et vidé, autant que la machine pneumatique peut le faire, de l'air du laboratoire qui le remplissait. En faisant entrer l'air sec pour la première fois, on voyait l'aiguille aller de 0° à 50°. Quand on pompait de nouveau, l'aiguille revenait à 0° pour retourner à 40°, quand on faisait rentrer l'air sec. Des épuisements souvent répétés auraient réduit cette

action presque à rien. Ces effets étaient dus uniquement à l'humidité déposée pendant la nuit sous forme de couche invisible à la surface intérieure du tube, que l'air sec enlevait en entrant et diffusait dans le tube. Quand l'air sec entrait à l'extrémité du tube la plus voisine de la source de chaleur, il arrivait que dans la première et la seconde introduction, et quelquefois même dans la troisième, la vapeur, entraînée de l'extrémité chaude à l'extrémité froide du tube, se précipitait et recouvrait sa paroi sur une longueur de près d'un pied. Ce précipité disparaissait toujours quand on faisait le vide. Est-il besoin de remarquer que ces faits, et je pourrais en citer un bien plus grand nombre, n'étaient pas de nature à me faire agir précipitamment et imprudemment. J'ai vu très-clairement combien il était facile de tomber dans les erreurs les plus graves, et j'ai pris toutes mes précautions pour m'en défendre....

« Désireux de faire évanouir jusqu'à l'ombre du doute, j'ai supprimé tout à fait les plaques de sel gemme, et j'ai opéré de cette manière : — Un réservoir en caoutchouc B (fig. 99) était rempli d'air ; on fixait sur l'orifice de sortie de l'air une pièce en T, munie de deux robinets Q,Q′. Le robinet Q′ communique avec les deux tubes U′, U′, remplis chacun de fragments de verre mouillés avec de l'eau distillée ; le robinet Q avec les tubes U,U remplis tous deux de fragments de verre mouillés avec de l'acide sulfurique. Les autres extrémités de ces deux séries de tube sont en relation avec les robinets O, O′ ; et, de la pièce en T qui unit ces robinets, part un tube se rendant à l'extrémité ouverte E′ du tube d'expérience. Le robinet A, à l'autre extrémité du tube d'expérience, communique avec une machine pneumatique. La pile P, l'écran S, et le cube compensateur C′ remplissent les mêmes fonctions que dans les premiers appareils. E est l'extrémité de la chambre antérieure, et C la source de chaleur. Dans quelques expériences j'ai fermé l'extrémité E avec une plaque de sel gemme, dans d'autres je l'ai laissée ouverte ; il y avait une distance d'environ 12 pouces entre la surface rayonnante et l'extrémité ouverte E′ du tube d'expérience.

« Les robinets Q et O étant fermés, Q′ et O′ ouverts, on exerçait une douce pression sur le réservoir B ; un courant d'air humide entrait lentement à l'extrémité E′ du tube d'expérience. On faisait agir alors la machine pneumatique communiquant avec le tube A, et l'on aspirait l'air dans le tube T. La déviation du galvanomètre était de 50°, quand l'air humide remplissait le tube aussi complétement que la disposition des appareils le permettait ; et cette déviation était due à la

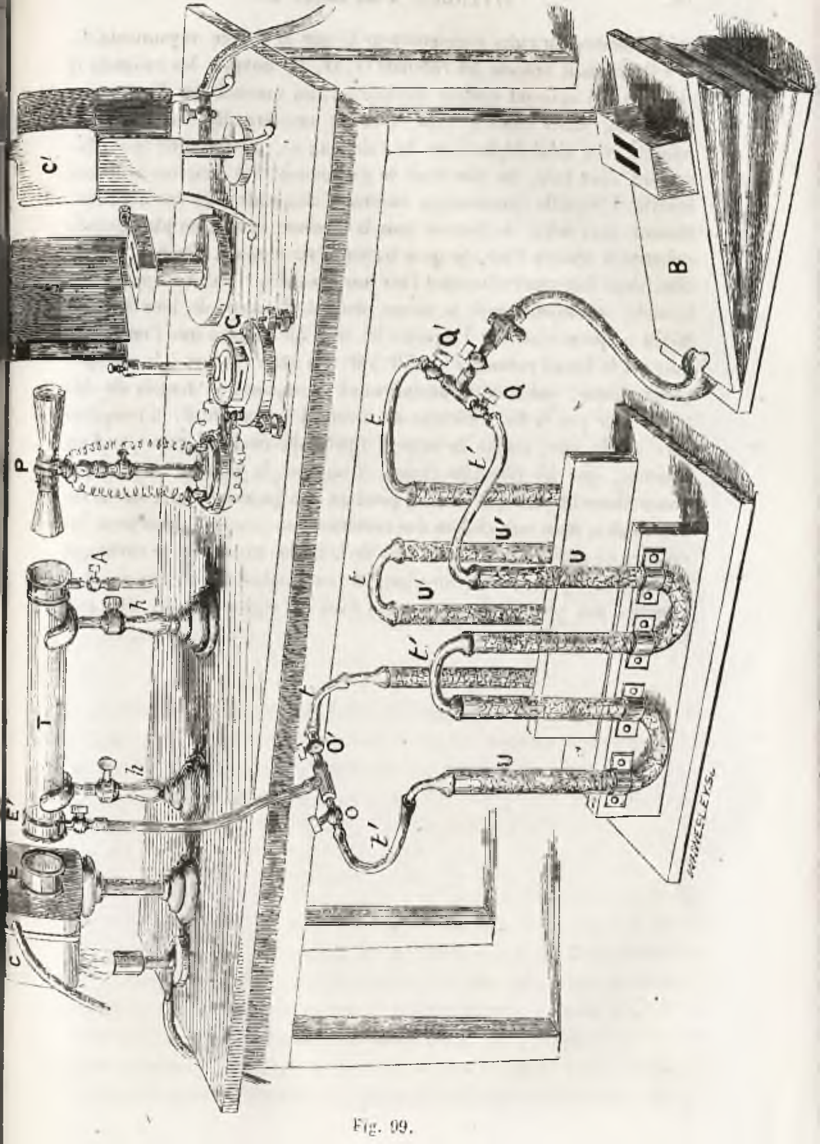


Fig. 99.

prédominance du cube compensateur C′ sur la source rayonnante C.

« On fermait ensuite les robinets Q′, O′, on ouvrait les robinets Q et O; et, en agissant comme auparavant, on amenait en E′ un courant d'air, attiré dans le tube T de la manière déjà décrite. L'air humide était ainsi déplacé par de l'air sec; et, pendant que le déplacement avait lieu, on observait le galvanomètre à distance avec une lunette. L'aiguille commençait bientôt à descendre, et revenait lentement vers zéro, indiquant que la chaleur passait en plus grande quantité à travers l'air sec qu'à travers l'air humide. On a substitué ainsi vingt fois successivement l'air humide à l'air sec, l'air sec à l'air humide, et toujours avec le même résultat. L'entrée de l'air humide faisait toujours mouvoir l'aiguille de 0° à 30°, tandis que l'entrée de l'air sec la faisait retomber de 30° à 0°. On avait recours à la machine pneumatique, parce que j'avais trouvé que quand je tentais de déplacer l'air par la force directe du courant venant de B, la température de la pile, ou de la source était tellement affectée par l'air nouveau, que les résultats étaient troublés. Je puis remarquer que non-seulement j'ai opéré ainsi, pendant des journées, avec de la vapeur d'eau, mais que chacun des résultats que j'avais obtenu avec les vapeurs en général a été confirmé de la même manière; de sorte que l'on peut, je pense, être absolument sans inquiétude relativement à l'emploi des plaques de sel gemme dans des recherches de cette nature. »

LEÇON XII

(10 AVRIL, 1862)

Rosée.—Un ciel clair et calme avec une atmosphère humide sont nécessaires à sa formation abondante. — Les substances chargées de rosée sont plus froides que celles qui ne le sont pas. — Les substances chargées de rosée rayonnent mieux que celles qui ne le sont pas. — La rosée est la condensation de la vapeur atmosphérique sur les substances qui ont été refroidies par le rayonnement. — Radiation lunaire. — Constitution du soleil.—Raies brillantes des spectres des métaux —Raies de Fraunhofer. — Constitution chimique du soleil. — Émission du soleil. — Expériences de MM. Herschel et Pouillet.—Théorie météorique de M. Mayer. — Effet des marées sur la rotation de la terre. — Énergies du système solaire.— MM. Helmholtz. Thomson, Waterston.— Rapport du soleil avec la vie animale et végétale.

Nous avons appris que notre atmosphère est toujours plus ou moins chargée de vapeur d'eau, dont la condensation forme les nuages, les brouillards, la grêle, la pluie et la neige. J'appelle maintenant votre attention sur un cas particulier de condensation, d'un grand intérêt et d'une grande beauté, et sur lequel, en outre, on a gardé longtemps des notions erronées. Je veux parler du phénomène de la rosée. La vapeur d'eau de notre atmosphère a un grand pouvoir de rayonnement, mais elle est diffusée dans l'air, dont la masse est habituellement plus de cent fois la sienne. Donc, non-seulement la chaleur propre de la vapeur d'eau, mais encore la chaleur propre d'une grande partie de l'air qui l'environne ou la dissout, doit être perdue par la vapeur avant qu'elle soit descendue à son point de condensation. Le retard apporté par cette perte à son refroidissement permet

aux corps bons radiateurs à la surface de la terre de devancer la vapeur dans leur refroidissement; et voilà pourquoi cette vapeur peut se condenser en liquide sur ces corps, ou même se congeler en givre, tandis qu'à quelques pieds au-dessus de la surface elle conserve encore son état gazeux. C'est réellement ce qui arrive dans le beau phénomène que nous avons maintenant à examiner.

Nous sommes redevables à un médecin de Londres de la vraie théorie de la rosée. En 1818, le docteur Wells publia son admirable *Essay* sur ce sujet. Il fit ses expériences dans un jardin du comté de Surrey, à une distance de trois milles de Blackfriars-Bridge. Pour recueillir la rosée, il se servait de petits flocons de laine, qui, quand ils étaient secs, pesaient 10 grains chacun. Les ayant exposés durant une nuit claire, il détermina la quantité de rosée déposée sur eux par l'augmentation de leur poids. Il constata bientôt que tout ce qui dérobait la vue du ciel à ses flocons de laine empêchait aussi le dépôt de rosée. Ayant mis une planche sur quatre supports, il plaça un de ses deux flocons de laine sur la planche, l'autre sous la planche; pendant la nuit claire et calme qui suivit, le premier gagna en poids 14 grains, tandis que le second n'en gagna que 4. Il donna à une feuille de carton la forme du toit d'une maison, et s'en servit pour abriter un flocon de laine déposé sur l'herbe; pendant l'exposition d'une seule nuit, le poids de la laine n'augmenta que de 2 grains, tandis qu'un flocon semblable, déposé sur l'herbe, tout à fait en dehors du toit de carton, absorba 16 grains d'humidité.

Est-ce la vapeur émanée de la terre, ou une pluie fine tombant du ciel, qui produit ce dépôt de rosée? Ces deux opinions ont été soutenues. Que la rosée ne s'élève pas de la terre, c'est un fait démontré par cette observation qu'il se dépose plus d'humidité sur la laine portée par la planche que sur la laine abritée par la planche. Que la rosée ne soit pas une pluie fine, cela est certain, puisque le dépôt le plus abondant se forme pendant les nuits les plus claires.

Plus tard le docteur Wells exposa des thermomètres, comme

il avait exposé des flocons de laine, et il trouva que *la température s'abaissait le plus* là où la rosée tombait le plus abondamment. Sur la planche, la température était de 9° plus basse que sous la planche; sous le toit de carton le thermomètre était de 10° plus élevé que sur l'herbe à découvert. Il trouva encore que quand il plaçait son thermomètre sur l'herbe, dans une nuit claire, il s'abaissait quelquefois de 14° au-dessous d'un thermomètre semblable suspendu à l'air libre à 4 pieds au-dessus de l'herbe. Le poids d'une pelote de coton, placée à côté du premier thermomètre, s'accrut de 20 grains; le poids d'une pelote semblable, placé à côté du second, augmenta seulement de 11 grains. *L'abaissement de la température et le dépôt de la rosée marchaient de pair.* Ce n'est pas seulement l'abri par un écran artificiel qui influe sur l'abaissement de la température et la formation de la rosée, il en est de même de l'abri par un nuage. Wells observa une fois que son thermomètre, qui, quand il était posé sur l'herbe, accusait une température de 12° plus basse que celle de l'air à quelques pieds au-dessus de l'herbe, monta, pendant le passage de quelques nuages, de manière à ne plus marquer que 2° au-dessous de l'air. Chaque fois que les nuages apparaissaient ou disparaissaient, la température de son thermomètre s'élevait ou s'abaissait.

Une série d'expériences pareilles, conçues et exécutées avec une clarté et une habileté singulières, avaient mis le docteur Wells à même de proposer une théorie de la rosée qui a résisté à l'épreuve de toutes les objections faites postérieurement, et qui est aujourd'hui universellement acceptée.

La rosée est l'effet du refroidissement par rayonnement. « Les parties supérieures de l'herbe rayonnent leur chaleur vers les régions de l'espace, qui, vide, ne peut pas rendre chaleur pour chaleur. Les parties inférieures de cette même herbe, à cause de la faiblesse de leur pouvoir conducteur, cèdent très-peu de la chaleur reçue de la terre aux parties supérieures, qui, en outre, ne recevant que très-peu de chaleur de l'atmosphère et rien des corps latéralement situés, deviennent plus froides que l'air, et condensent en rosée la vapeur d'eau qu'il renferme quand elle est suffisamment

abondante ou en rapport avec l'abaissement de température de l'herbe. » Pourquoi la vapeur, dont la puissance de radiation est si grande, ne se refroidit-elle pas elle-même aussi vite que l'herbe? Je l'ai déjà expliqué : par la raison que la vapeur n'a pas seulement sa propre chaleur à faire se dissiper, mais aussi celle de la grande masse d'air dont elle est environnée.

La rosée étant le résultat de la condensation de la vapeur atmosphérique sur les substances suffisamment refroidies par le rayonnement, et les corps différant beaucoup dans leur pouvoir rayonnant, nous devions nous attendre à des différences correspondantes dans le dépôt de la rosée. Wells a prouvé qu'il en était ainsi. Il vit souvent de la rosée déposée abondamment sur de l'herbe et du bois peint, tandis qu'il n'en rencontrait jamais sur les allées sablées adjacentes. Il trouva parfaitement sèches des plaques de métal, tandis que d'autres corps adjacents étaient couverts de rosée : et *dans tous les cas la température du métal se trouvait plus élevée que celle des substances mouillées de rosée*. Ceci s'accorde entièrement avec ce que nous savions déjà, que les métaux sont au dernier rang quant au pouvoir rayonnant. Dans une occasion, il plaça une plaque de métal sur l'herbe, et il posa sur la plaque un thermomètre de verre ; le thermomètre, après quelque temps, se couvrit de rosée, tandis que la plaque était restée sèche. Ceci le conduisit à supposer que l'instrument, quoique reposant sur la plaque, ne partageait pas sa température. Il plaça un second thermomètre, avec une boule dorée, à côté du premier ; le thermomètre à boule nue, en verre, substance douée d'un pouvoir rayonnant considérable, resta à 9° au-dessous de son compagnon. Déterminer la température vraie d'un corps est, je dois le faire remarquer, une entreprise difficile ; un thermomètre de verre, suspendu dans l'air, ne donne pas la température de l'air, parce que son pouvoir propre, comme corps rayonnant ou absorbant, entre en jeu. Par un jour clair, quand le soleil brille, le thermomètre sera plus chaud que l'air. Par une nuit claire, au contraire, le thermomètre sera plus froid que l'air. Nous avons vu que le passage d'un nuage peut, en quelques minutes, élever la températur

d'un thermomètre de 10 degrés. Cette élévation évidemment, n'indique pas une augmentation correspondante de la température de l'air; elle est simplement le résultat de l'absorption d'abord, de la réflexion ensuite, par le nuage, des rayons de chaleur émis par le thermomètre.

Le docteur Wells a appliqué ses principes à l'explication de plusieurs effets curieux et au redressement de plusieurs erreurs populaires.

Il attribue l'action d'aveuglement dont on accusait les rayons de la lune au froid dû au rayonnement par un ciel clair; l'éclat de la lune n'intervenant dans cet accident que comme indice de la limpidité de l'atmosphère. L'action putréfiante, attribuée aussi aux rayons de la lune, est réellement due à un dépôt d'humidité ou d'une sorte de rosée sur les substances animales exposées à l'air. La destruction des plantes délicates par la gelée, lors même que l'air du jardin est à quelques degrés au-dessus de la température de la glace, n'a pas non plus d'autre cause que le refroidissement par rayonnement. Un écran de toile d'araignée suffirait à les préserver de tout dommage[1].

Wells fut le premier qui expliqua la production artificielle de la glace au Bengale, où elle ne se forme jamais naturellement. On creuse des fossés peu profonds que l'on remplit en partie de paille, et sur la paille on expose au ciel pur des bassins plats contenant de l'eau qu'on a fait bouillir. L'eau a un grand pouvoir de radiation; elle envoie en abondance sa chaleur dans l'espace; et la chaleur ainsi perdue ne peut pas être remplacée

[1] Nous citerons, à ce sujet, ce beau passage de l'*Essay* de Wells : « Dans l'orgueil d'une demi-science, j'ai souvent souri des moyens fréquemment employés par les jardiniers pour protéger les plantes délicates contre le froid, parce qu'il me semblait impossible qu'un mince paillasson ou quelque autre abri de cette espèce pût les empêcher de descendre à la température de l'atmosphère, par laquelle seule je les croyais exposées à être endommagées. Mais, quand j'eus appris que des corps à la surface de la terre deviennent, pendant une nuit calme et sereine, plus froids que l'atmosphère, en rayonnant leur chaleur vers les cieux, je trouvai, dans ce seul fait, la raison suffisante d'une pratique qu'auparavant j'avais jugée inefficace et inutile. »

par la chaleur de la terre, que la paille non conductrice arrête au passage. Le soleil n'est pas levé que déjà de la glace s'est formée dans chaque vase. Telle est l'explication de Wells, et c'est sans aucun doute l'explication véritable. Je pense toutefois qu'elle a besoin d'un complément. Il paraît, d'après les descriptions venues jusqu'à nous, que la condition la plus propice à la formation de la glace n'est pas seulement un ciel pur, mais aussi une atmosphère sèche. Les nuits, dit sir Robert Barker, les plus favorables à la production de la glace sont celles qui sont les plus claires et les plus sereines, *et pendant lesquelles il apparaît très-peu de rosée après minuit.* J'ai écrit en italique cette phrase très-significative. Pour produire de la glace en abondance, l'atmosphère ne doit pas seulement être claire, elle doit, en outre, être comparativement privée de vapeur d'eau. Quand la paille sur laquelle reposaient les bassins devenait humide, on la remplaçait par de la paille sèche; et la raison que Wells assignait à cela, c'est que la paille, mouillée et devenue plus compacte, agissait comme un corps conducteur. Cela peut être, mais il est certain aussi que la vapeur, en s'élevant de la paille humide et en se répandant sur les bassins, serait devenue un écran qui aurait arrêté le refroidissement par rayonnement et retardé la congélation.

Wells a poursuivi et complété ses belles recherches avec une santé délabrée; et il avait un pied dans la tombe lorsqu'il composa son essai, modèle de sagacité dans les recherches et de clarté dans l'exposition. Il ne se pressa point, mais il ne prit point de repos jusqu'à ce qu'il se fût rendu maître de son sujet, l'étudiant sans cesse jusqu'à ce qu'il fût devenu pleinement transparent à ses regards. Il résolut ainsi son problème, et il en établit la solution sous une forme qui rend son œuvre impérissable [1].

Après lui, plusieurs expérimentateurs se sont occupés de la question du rayonnement nocturne; ils ont réuni un grand nombre de faits précieux; mais, si nous en exceptons un supplé-

[1] Le traité de Wells est précédé d'un mémoire sur sa vie, écrit par lui-même. Il a toute la solidité d'un Essay de Montaigne.

ment dû à Melloni, ils n'ont rien ajouté d'important à la théorie de Wells. M. Glaisher, M. Martins et d'autres se sont occupés de ce sujet. Le tableau suivant contient les résultats obtenus par M. Glaisher, en exposant des thermomètres à différentes hauteurs au-dessus de la surface d'une prairie. Le refroidissement observé lorsque le thermomètre reposait sur l'herbe longue, est représenté par le nombre 1000; tandis que les nombres qui suivent représentent le refroidissement relatif des thermomètres placés dans les positions indiquées :

RAYONNEMENT.

Herbe longue.			1000
Un pouce au-dessus des pointes de l'herbe. . . .			671
Deux pouces	—	— . . .	570
Trois pouces	—	— . . .	477
Six pouces	—	— . . .	282
Un pied	—	— . . .	129
Deux pieds	—	— . . .	86
Quatre pieds	—	— . . .	69
Six pieds	—	— . . .	52

On peut demander pourquoi le thermomètre, corps qui rayonne bien, ne se refroidit pas autant quand il est suspendu à l'air libre que quand il pose sur la surface de la terre. Wells a répondu à cette question. C'est parce que le thermomètre, en se refroidissant, refroidit l'air en contact immédiat avec lui; cet air se condense, devient lourd, et descend, laissant ainsi prendre sa place par de l'air plus chaud. C'est ainsi que le thermomètre libre est empêché de descendre beaucoup au-dessous de la température de l'air. De là aussi la nécessité d'une nuit tranquille pour la formation d'une rosée abondante; car, quand le vent souffle, de l'air nouveau circule continuellement entre les tiges d'herbe, et empêche que le refroidissement par rayonnement puisse devenir considérable.

Lorsqu'un corps rayonnant est exposé à un ciel clair, il tend à garder, si je puis m'exprimer ainsi, une certaine distance thermométrique entre sa température et celle de l'air environnant. Cette distance dépend de l'énergie de rayonnement possédée par

le corps; mais elle est presque indépendante de la température de l'air. Ainsi M. Pouillet a vu que dans le mois d'avril, quand la température de l'air était à 3°,6 C., du duvet de cygne descendait par rayonnement à 5°,5; le refroidissement total était donc de 7°,1. Dans le mois de juin, quand la température de l'air était 17°,75 C,, la température du duvet de cygne s'abaissait par le rayonnement à 10°,54, et le refroidissement était encore cette fois de 7°,21, presque exactement le même que dans le mois d'avril. Ainsi, tandis que la température générale varie entre des limites très-larges, la *différence* de température entre le corps rayonnant et l'air environnant demeure sensiblement constante.

Ces faits conduisirent Melloni à faire une addition importante à la théorie de la rosée. Il trouva qu'un thermomètre de verre, placé sur le sol, ne descend jamais de plus de 2° C. au-dessous d'un thermomètre à boule argentée placé à côté, et qui rayonne cependant très-peu. Ces 2° C., ou à peu près, sont ce que nous avons appelé la distance thermométrique que le verre tend à garder entre lui et l'air environnant. Mais Six, Wilson, Wells, Parry, Scoresby, Glaisher et d'autres ont trouvé des différences de plus de 10° C. entre un thermomètre placé sur l'herbe et un second thermomètre suspendu à quelques pieds au-dessus de l'herbe. Comment ces faits peuvent-ils s'expliquer? Très-simplement, selon Melloni, et comme il suit : Les tiges d'herbe se refroidissent d'abord, par le rayonnement, de 2° au-dessous de l'air environnant; l'air est alors refroidi par le contact avec l'herbe, et forme autour d'elle un bain d'air froid. Mais la tendance de l'herbe est de conserver la distance constante, dont il a été question, entre sa propre température et celle du milieu environnant. Elle descend donc plus bas. L'air descend à son tour, refroidi de plus en plus par le contact avec l'herbe; mais l'herbe cherche de nouveau à rétablir la différence première, elle est de nouveau suivie par l'air, et ainsi, par une série d'actions et de réactions, la couche entière d'air en contact avec l'herbe descend bien au-dessous de la température qui correspond au pouvoir rayonnant réel de l'herbe.

En voilà assez sur la radiation terrestre ; celle de la lune ne nous occupera pas aussi longtemps. On avait fait beaucoup de tentatives inutiles pour mettre en évidence la chaleur des rayons de la lune. On ne saurait douter que chaque rayon lumineux est aussi un rayon de chaleur ; mais le pouvoir éclairant d'un rayon n'est pas même une mesure approchée de son pouvoir calorifique. Au moyen d'une lentille polygonale, Melloni fit converger sur sa pile les rayons de la lune : mais il trouva que le froid de sa lentille, dû au rayonnement nocturne, était bien plus que suffisant pour masquer la chaleur de la lune, si tant est qu'elle en eût. Il mit sa lentille à l'abri du ciel, plaça sa pile au foyer de la lentille, attendit que l'aiguille descendît à 0°, et, écartant subitement son écran, il laissa les rayons concentrés arriver à la pile. Les légers courants d'air du lieu de l'expérience suffisaient encore pour masquer l'effet cherché. Il ferma alors le tube qui regardait la pile avec des écrans de verre, à travers lesquels la lumière arrivait librement à la face noircie de la pile, où elle était convertie en chaleur. Cette chaleur ne pouvait pas revenir sur ses pas à travers l'écran de verre ; Melloni, imitant l'exemple de Saussure, accumula ses effets, et obtint une déviation de 3 ou 4 degrés. La déviation indiquait de la chaleur, et c'est la seule preuve positive que nous ayons de l'action calorifique des rayons de la lune. Incomparablement moins puissante en elle-même que les rayons solaires, leur action est affaiblie en premier lieu par la distance, et en second lieu par ce fait que *la chaleur obscure de la lune* est presque totalement absorbée par la vapeur d'eau de l'atmosphère. Alors même que ces rayons obscurs réussiraient à atteindre la terre, ils seraient entièrement absorbés par une lentille semblable à celle dont Melloni s'est servi. Il y aurait grand intérêt à répéter l'expérience avec un réflecteur métallique, en place d'une lentille. J'ai fait usage, de mon côté, d'un réflecteur conique de grandes dimensions, mais jusqu'à présent j'ai été déjoué par l'instabilité de l'atmosphère de Londres.

Nous avons maintenant à diriger nos pensées vers la source d'où dérive toute chaleur terrestre et lunaire. Cette source est le soleil ; car si la terre a jamais été un globe en fusion, actuelle-

ment en voie de refroidissement, la quantité de chaleur qui monte de son intérieur à sa surface a cessé depuis longtemps d'être sensible. Cherchons donc d'abord quelle est la constitution de ce corps merveilleux, à qui nous devons à la fois la lumière, la chaleur et la vie.

Abordons pas à pas ce sujet difficile, et préparons nos esprits par des notions préliminaires à la discussion de ce noble problème.

Vous savez déjà comment est formé le spectre de la lumière électrique. En voici un sur l'écran, haut de deux pieds et long de huit pieds, avec toute sa magnifique série de couleurs graduées, se fondant l'une dans l'autre sans solution de continuité. La lumière d'où ce spectre dérive, est émise par les pointes de charbon incandescent placées au sein de notre lampe électrique. Tous les corps solides donnent un spectre semblable. Quand, par un courant électrique, je chauffe à blanc ce fil de platine, et que j'étale sa lumière en spectre, je retrouve la même série graduée de couleurs, et il n'y a pas non plus de lacune entre une couleur et l'autre. Mais par une chaleur intense, par la chaleur, par exemple, de la lampe électrique, je fais volatiliser ce platine, et projeter sur l'écran, non plus le spectre du solide incandescent, mais celui de la vapeur incandescente. Tout alors est changé. Au lieu d'une gradation continue de couleurs, le spectre montre une série de raies brillantes, séparées l'une de l'autre par des espaces obscurs.

J'ai disposé mes pointes de charbon de cette manière : le charbon inférieur est maintenant un cylindre, ayant environ un demi-pouce de diamètre, et, au sommet duquel j'ai creusé une petite cavité ; je place dans cette cavité le métal que je veux examiner, par exemple, ce morceau de zinc, et j'abaisse jusqu'à lui la pointe du charbon supérieur. Le courant passe ; j'écarte les pointes, et vous voyez l'arc magnifique qui maintenant les unit ; son image agrandie se montre à vous sur l'écran sous forme d'un beau ruban de lumière pourpre long de 16 pouces. Cet espace coloré contient les particules de zinc qui vont d'un charbon à l'autre ; ces particules exécutent actuellement des

oscillations de périodes définies, et la couleur que nous apercevons est le mélange des impressions dues à ces oscillations. Analysons par un prisme le ruban coloré ; voici ses composantes séparées; ce sont des raies splendides de rouge et de bleu. N'oubliez pas, je vous en prie, le caractère et la position de ces raies, parce que nous y reviendrons tout à l'heure.

J'interromps le courant; je retire le zinc, et je mets à sa place un morceau de cuivre. Vous voyez naître entre les pointes des charbons une traînée de lumière verte que nous allons analyser comme nous avons fait de la lumière du zinc. Le spectre du cuivre est, vous le voyez, très-différent de celui du zinc; il est caractérisé par des raies vertes brillantes qui n'existaient pas dans le zinc. Nous pouvons donc conclure avec certitude que les périodes d'oscillation des atomes du cuivre dans l'arc voltaïque sont très-différentes de celles des atomes du zinc. Voyons maintenant si ces périodes différentes engendreront quelque confusion, quand nous opérerons sur une substance composée de zinc et de cuivre, sur le laiton, par exemple, qui vous est si familier. Son spectre est maintenant sous vos yeux; et si vous avez gardé l'impression reçue dans nos deux dernières expériences, vous y reconnaîtrez un spectre formé de la superposition des deux spectres séparés du zinc et du cuivre. L'alliage émet sans confusion les rayons propres des deux métaux dont il est composé.

Chaque métal émet son système propre de raies tout aussi caractéristiques que les qualités physiques et chimiques qui lui donnent son individualité. Par des méthodes d'expérience suffisamment délicates, nous pouvons mesurer exactement la position des raies brillantes de chaque métal connu. Puis, familiarisés avec ces raies, nous pourrons, à la seule inspection du spectre d'un métal particulier, dire son nom. Et cela, non-seulement dans le cas d'un spectre simple, mais encore dans le cas d'un spectre composé, en désignant les métaux dont le mélange est formé.

Ceci est vrai, non-seulement des métaux eux-mêmes, mais encore de leurs composés, s'ils sont volatils. Je place un mor-

ceau de sodium sur mon charbon inférieur, et je fais passer la décharge voltaïque du sodium au charbon supérieur, voici le spectre du sodium ; une seule raie d'un jaune brillant. En opérant avec des appareils assez puissants je puis résoudre cette raie en deux autres séparées par un intervalle obscur et étroit. Je retire le sodium de la lampe, et je mets à sa place un peu de sel commun ou de chlorure de sodium. A cette haute température le sel est volatil, et vous voyez exactement reproduite par le sel cette même raie jaune donnée d'abord par le métal. Je reproduis de même avec le chlorure de strontium les raies du métal strontium ; avec les chlorures de calcium, de magnesium et de lithium, les raies correspondantes à ces divers métaux.

Voici, enfin, un cylindre de charbon, percé de trous, que j'ai remplis avec un mélange de tous les composés que je viens de nommer ; et *voilà*, projeté sur l'écran, le spectre du mélange. Assurément, on ne saurait rien imaginer de plus magnifique. Chaque substance donne ses raies propres, qui partagent ainsi transversalement le spectre total, long de huit pieds en bandes parallèles de lumière splendidement colorée. Si vous avez pris soin de faire connaissance préalablement avec les raies émises par chaque métal, vous êtes en état de démêler ce spectre, et de me dire quelles substances j'ai employées dans sa production.

J'ai fait usage de l'arc voltaïque, uniquement parce que sa lumière est si intense, qu'elle est visible à un auditoire nombreux, comme celui-ci qui remplit cette salle ; mais je puis faire les mêmes expériences avec la flamme ordinaire du chalumeau, qui est presque privée de lumière par un mélange très-abondant d'air ou d'oxygène. L'introduction du sodium ou du chlorure de sodium rend la flamme jaune ; le strontium la fait passer au rouge ; le cuivre au vert, etc. Les flammes ainsi colorées, quand on les examine au prisme, montrent exactement les mêmes raies que j'ai projetées devant vous sur l'écran.

Nous avons déjà appris que les gaz et les vapeurs absorbent les rayons de chaleur obscure qui les traversent. Je ne doute pas que si ces rayons pouvaient faire impression sur les yeux,

que si je pouvais les étaler devant vous comme les couleurs du spectre, vous constateriez que, dans chaque cas, ce sont certaines classes de rayons qui subissent la destruction, tandis que pour les autres le passage est entièrement libre. Une expérience fameuse de Sir David Brewster, que je vais répéter sous une forme mieux appropriée à une leçon d'amphithéâtre, me permettra de mettre en évidence, dans le cas de la lumière, ce pouvoir d'élection. Dans ce cylindre, dont les extrémités sont fermées par des plaques de verre, j'introduis une certaine quantité de vapeur de gaz nitreux, dont la présence se manifeste par sa riche couleur fauve. Je projette sur l'écran un spectre long de huit pieds, large de près de deux pieds, et je place ce cylindre contenant le gaz rutilant sur le passage du faisceau à sa sortie de la lampe. Voyez l'effet produit; le spectre continu est maintenant sillonné de nombreuses bandes obscures ; les rayons qui leur correspondent sont détruits par le gaz nitreux, qui permet aux rayons intermédiaires de lumière de passer sans obstacle.

Nous avons maintenant à faire un pas de plus vers le principe de réciprocité que j'ai déjà énoncé. Jusqu'ici nous avons trouvé que, pour les gaz, les liquides et les solides, les corps qui absorbent bien sont aussi corps qui rayonnent bien ; nous devons maintenant aller plus loin, et établir qu'un *gaz et une vapeur absorbent précisément les mêmes rayons qu'ils peuvent eux-mêmes émettre* ; que les atomes qui, en vibrant, exécutent un certain nombre de vibrations, arrêtent les ondes excitées par des atomes qui vibrent synchroniquement ; les atomes qui vibrent à l'unisson du rouge, du jaune, du vert, et ainsi de suite, arrêteront respectivement les rayons rouges, jaunes, verts, etc. L'absorption, comme vous savez, est le transport du mouvement de l'éther aux particules qui y sont plongées, et l'absorption de chaque atome s'exerce principalement sur les ondes qui arrivent à lui avec des nombres de vibrations égaux au nombre de ses propres oscillations.

Essayons de prouver expérimentalement qu'il en est ainsi. Nous savons déjà qu'une flamme de sodium, analysée par le

spectre, donne une double raie brillante jaune. Voici un vase plat, contenant un mélange d'alcool et d'eau; je chauffe le mélange et je l'enflamme; il donne une flamme si faiblement lumineuse, qu'elle est à peine visible. Je mêle maintenant du sel avec le liquide, et je l'enflamme de nouveau; la flamme, qui tout à l'heure pouvait à peine se voir, est maintenant d'un jaune brillant. Je projette un spectre continu sur l'écran, et sur le passage du faisceau, à sa sortie de la lampe, je place la flamme jaune du sodium. Observez le spectre de près; vous voyez dans le jaune une bande grise, d'aspect changeant, assez foncée quelquefois, ce qui prouve que la flamme du sodium a intercepté, au moins en partie, la raie jaune du spectre; c'est-à-dire que cette flamme a partiellement absorbé précisément la lumière qu'elle peut émettre elle-même.

Mais je tiens à rendre l'effet plus évident; j'abandonne donc la lumière de l'alcool, et procède de cette manière : Je prends un brûleur de Bunsen, dont la flamme a une chaleur intense, quoiqu'elle émette très-peu de lumière. Je place le brûleur en avant de la lampe électrique, de sorte que le faisceau, dont la décomposition doit former notre spectre, traverse la flamme. J'ai ici une petite capsule en fils de platine sur laquelle je place un morceau de sodium, gros à peu près comme un pois. Je dresse en outre une feuille de carton, qui empêche la lumière émise par le sodium d'éclairer l'écran sur lequel tombe le spectre. Je suis prêt à faire l'expérience. Voici d'abord le spectre. Je pose maintenant la capsule de platine sur le brûleur; à l'instant le sodium colore la flamme en un jaune intense, et vous voyez une ombre envahir le jaune du spectre. Mais l'effet n'a pas encore atteint son maximum. La combustion du sodium prend tout à coup une intensité plus grande, et vous voyez le jaune du spectre s'éteindre tout à fait; une bande sombre très-épaisse a pris sa place. Cette combustion violente durera peu de temps. Je retire la flamme; le jaune reparaît sur l'écran; je la ramène de nouveau; la bande jaune disparaît. Je pourrais répéter la même opération dix fois; et je ne sache pas que dans toute l'optique on puisse citer une expérience plus frappante.

Nous avons donc prouvé, de la manière la plus concluante, que la lumière absorbée par la flamme de sodium est précisément la lumière que cette même flamme émet.

Permettez-moi d'être encore plus précis dans mon expérience. Le jaune du spectre s'étend sur un large intervalle; et je désire maintenant vous faire voir que c'est particulièrement la portion du jaune émise par le sodium qui est absorbée par sa flamme. Je place un peu de sel en dissolution à l'extrémité de mes pointes de charbon; et voici le spectre continu, avec la raie caractéristique du sodium plus brillante que le reste du jaune. Cette raie vous apparaît très-nettement définie. Je fais passer de nouveau la lumière à travers la flamme de sodium, et la raie individuelle qui se détachait si nettement sur le spectre est supprimée; un espace d'un sombre intense a pris sa place.

Vous avez vu déjà un spectre provenant d'un mélange de diverses substances, et formé d'une série de raies nettement définies et brillantes, séparées les unes des autres par des espaces obscurs. Si je pouvais prendre le mélange qui produisait ce spectre sillonné de raies, et l'élever, au moyen d'un brûleur de Bunsen, à une température suffisamment intense pour l'amener à l'état de vapeurs incandescentes: puis placer la flamme ainsi obtenue sur le passage du faisceau qui produit un spectre continu, je supprimerais de cet ensemble de rayons ceux précisément qui étaient d'abord émis par le mélange. De cette manière, au lieu de sillonner mon spectre d'une seule raie obscure, comme dans le cas du sodium, je le sillonnerais d'une série de raies obscures, égales en nombre à celui des raies brillantes qui se produisaient quand le mélange était lui-même la source de lumière.

Il me semble maintenant que nous sommes en possession d'assez de données pour nous élever au niveau d'une des généralisations les plus remarquables de notre époque. Quand la lumière du soleil est convenablement décomposée, le spectre paraît sillonné de raies *obscures* innombrables. Un petit nombre d'entre elles avaient été observées, pour la première fois, par Wollaston; mais, plus tard, Fraunhofer les a étudiées avec une intelligence si profonde, que depuis on les a appelées *raies de*

Fraunhofer. On a supposé longtemps que ces espaces obscurs avaient pour cause l'absorption, par l'atmosphère du soleil, des rayons qui leur correspondent; mais personne ne savait le comment de cette absorption. Quand il fut une fois prouvé qu'une vapeur incandescente absorbe précisément les rayons qu'elle peut elle-même émettre, et, sachant que le corps du soleil est environné d'une photosphère incandescente, la pensée vint aussitôt à l'esprit que la photosphère devait absorber parmi les rayons du noyau central incandescent ceux que cette photosphère est elle-même capable d'émettre. Nous sommes ainsi amenés à une théorie de la constitution du soleil, qui rend complétement compte des raies de Fraunhofer.

Le soleil consiste en un noyau sphérique central, liquide ou solide, d'un éclat excessif, qui, par lui-même, donnerait un spectre continu, ou en d'autres termes, qui émettrait toutes sortes de rayons. Mais les rayons ont à traverser la photosphère, qui enveloppe le soleil comme une flamme ; or cette enveloppe vaporeuse absorbe parmi les rayons du noyau ceux qu'elle-même émettrait; et les raies de Fraunhofer marquent la position de ces rayons éteints. Si nous pouvions supprimer le globe central et obtenir le spectre de l'enveloppe gazeuse, nous obtiendrions un spectre discontinu dans lequel chaque raie brillante coïnciderait avec une raie de Fraunhofer. Celles-ci sont donc des espaces d'une obscurité relative, et non pas absolue; sur elles tombent les rayons de la photosphère absorbante; mais ces rayons, n'étant pas assez intenses pour compenser la lumière absorbée, les espaces qu'elles éclairent restent obscurs, en comparaison de l'éclat général du spectre.

On a pendant longtemps supposé que le soleil et les planètes avaient une même origine ; et que, par conséquent, les mêmes substances devraient entrer dans leur composition. Pouvons-nous mettre en évidence dans le soleil la présence de quelqu'une de nos substances terrestres? J'ai déjà dit que les raies brillantes d'un métal étaient caractéristiques de ce métal; que nous pouvions, sans voir le métal, dire son nom à l'inspection des raies; que les raies sont, pour ainsi dire, la *voix* du métal annonçant

sa présence. Donc, si quelques-uns des métaux de notre terre font partie de l'atmosphère du soleil, les raies obscures que ces métaux produisent doivent coïncider exactement avec les raies brillantes émises par la vapeur des métaux dont il s'agit. Dans le cas du seul fer, on a déterminé environ 60 raies qui le caractérisent. Or quand on amène la lumière émanée de la vapeur incandescente de fer, produite par le passage de l'étincelle électrique entre les pointes de deux fils de fer, à passer par la moitié d'une fente étroite, pendant que la lumière du soleil passe par l'autre moitié, les spectres des deux sources sont alors juxtaposés; et, dans cette juxta-position, on constate qu'à chaque raie brillante du spectre du fer correspond exactement une raie obscure du spectre solaire. Soumise au calcul, cette expérience fait voir qu'il y a plus de 1 000 000 000 000 000 000 à parier contre un qu'il y a du fer dans l'atmosphère du soleil. En comparant de la même manière les spectres des autres métaux, M. le professeur Kirchhoff, au génie duquel nous devons cette magnifique généralisation, a trouvé que le fer, le calcium, le magnésium, le sodium, le chrome et d'autres métaux entraient dans l'atmosphère du soleil; mais il ne lui a pas été possible, jusqu'à présent, d'y découvrir l'or, l'argent, le mercure, l'aluminium, l'étain, l'arsenic, ou l'antimoine.

Je puis imiter d'une manière plus exacte que je ne l'ai fait jusqu'ici, la constitution du soleil telle que nous venons de la définir. Je place dans la lampe électrique un cylindre de charbon d'un pouce environ de diamètre, au sommet; et j'entoure les bords du cylindre d'un anneau de sodium, laissant à découvert son noyau central. J'abaisse alors la pointe supérieure de charbon sur le milieu de la surface supérieure du cylindre, pour produire la lumière électrique ordinaire. Cette lumière est assez près du sodium pour le volatiser ; mon petit soleil central se trouve ainsi environné d'une atmosphère de vapeur de sodium, comme le vrai soleil est environné de sa photosphère; et vous voyez que le spectre de cette lumière manque de la raie jaune.

L'énergie de la radiation solaire a été mesurée par sir John

Herschel au cap de Bonne-Espérance, et par M. Pouillet à Paris. L'accord entre ces deux séries de mesures est très-remarquable. sir John Herschel, a trouvé que l'effet calorifique d'un soleil vertical, au niveau de la mer, suffit à faire fondre $0^{mm},1915$ de glace par minute ; tandis, que selon M. Pouillet, la quantité de glace fondue serait $0^{mm},1786$. La moyenne de ces deux déterminations ne peut pas être bien loin de la vérité ; elle est de $0^{mm},1850$, ou 1,11 cent. de glace par minute, ou de plus d'un centimètre (11 *millimètres*) par heure. Je mets sous vos yeux (fig 100), un instrument semblable à celui dont s'est servi M. Pouillet, et qu'il a appelé pyrhéliomètre.

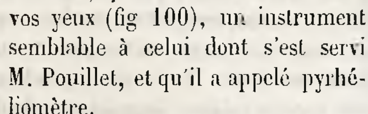


Fig. 100.

Le modèle que vous voyez est composé d'un cylindre fermé et peu profond en acier, *a a* rempli de mercure ; on introduit dans le cylindre un thermomètre *d*, dont la tige est protégée par un tube en laiton. Nous obtenons ainsi la température du mercure. L'extrémité plane du cylindre doit être tournée vers le soleil, avec sa surface recouverte de noir de fumée. *c*, *c* sont un collet et une vis à l'aide desquels l'instrument peut être fixé à un poteau planté dans le sol, ou dans la neige, si les observations sont faites à de grandes hauteurs. Il est nécessaire, que la surface qui reçoit les rayons du soleil soit bien perpendiculaire à ces rayons ; on s'assure qu'il en est ainsi, en fixant au tube de laiton, qui protége la tige du thermomètre, un disque *e e*, précisément de même diamètre que le cylindre d'acier. Quand l'ombre du cylindre couvre exactement le disque, nous sommes sûrs que les rayons tombent perpen-

diculairement à la surface du cylindre tournée vers le soleil.

Les observations se font de la manière suivante : On a soin, d'abord, que l'instrument ne reçoive pas les rayons du soleil, mais qu'il rayonne sa propre chaleur pendant cinq minutes, vers une partie du firmament tout à fait sans nuages; on prend note de l'abaissement de la température du mercure causé par ce rayonnement. On tourne ensuite l'instrument du côté du soleil, de sorte que les rayons solaires tombent perpendiculairement sur lui pendant cinq minutes, et l'on note l'élévation de la température. Enfin, on dirige de nouveau l'instrument vers le firmament, en dehors du soleil ; on le laisse rayonner pendant cinq autres minutes, et l'on note comme auparavant l'abaissement du thermomètre. Vous pourriez peut-être supposer que la seule exposition au soleil serait suffisante pour déterminer son pouvoir échauffant ; mais nous ne devons pas oublier que, pendant tout le temps de l'exposition à l'action du soleil, la surface noircie du cylindre rayonne aussi dans l'espace; tout n'est donc pas profit pour elle. La chaleur reçue du soleil est perdue en partie pendant que l'expérience marche, et pour connaître la quantité perdue, la première et la dernière expérience sont nécessaires. Pour obtenir la totalité du pouvoir échauffant du soleil, il faut ajouter au pouvoir échauffant observé la quantité perdue pendant le temps de l'exposition, qui est la moyenne entre la première observation et la dernière. Supposons que la lettre R représente l'augmentation de température pendant cinq minutes d'exposition au soleil, et que t et t' représentent les abaissements de température observés avant et après, l'énergie totale du soleil, que nous pouvons appeler T, sera alors exprimée ainsi :

$$R = T + \frac{t + t'}{2}$$

La surface sur laquelle tombent les rayons du soleil est connue, ainsi que la quantité de mercure contenue dans le cylindre; nous pouvons donc exprimer l'effet de la chaleur du soleil sur une surface donnée, en déterminant celle qui est capable d'élever, en cinq minutes, de tel nombre de degrés, la tempéra-

ture de telle quantité de mercure, ou de telle quantité d'eau. L'eau en effet, avait remplacé le mercure, dans le pyrhéliomètre de M. Pouillet.

Les observations ont été faites à différentes heures du jour, et, par conséquent, à travers des épaisseurs différentes de l'atmosphère de la terre, épaisseurs croissantes à partir du minimum qui avait lieu à midi, jusqu'au maximum à six heures du soir, époque de la dernière observation. On a trouvé que l'énergie solaire diminuait suivant une certaine loi, à mesure que croissait l'épaisseur d'air traversée par les rayons du soleil ; et de cette loi, M. Pouillet, a pu conclure ce que devrait être l'absorption exercée par l'atmosphère sur un faisceau solaire, dans le cas où le faisceau tomberait du zénith sur l'instrument. Il a trouvé que cette absorption serait de 25 pour 100. Sans doute qu'elle s'exercerait principalement sur les ondulations les plus longues de la radiation solaire, puisque c'est la vapeur aqueuse de l'air, et non l'air lui-même, qui est l'agent principal d'absorption. En tenant compte de l'ensemble entier de l'hémisphère terrestre tourné du côté du soleil, la quantité absorbée par l'enveloppe atmosphérique est les quatre dixièmes du rayonnement total dirigé vers la terre ; de sorte que si l'atmosphère était supprimée, l'hémisphère éclairé de la terre recevrait près du double de la quantité de chaleur qui lui arrive maintenant du soleil. Si la quantité de chaleur solaire reçue par la terre en un an était distribuée uniformément sur la surface de la terre, elle serait suffisante pour liquéfier une couche de glace de 30 mètres d'épaisseur, et couvrant toute la terre.

Sachant ainsi ce que la terre reçoit annuellement, nous pouvons calculer la quantité totale de chaleur émise par le soleil en un an. Concevez une sphère creuse environnant le soleil, dont le centre soit le centre du soleil, et dont la surface soit à la distance de la terre au soleil. La section de la terre coupée par cette surface est à la superficie totale de la sphère creuse, comme 1 : 2 300 000 000 ; d'où il suit que la quantité de chaleur solaire interceptée par la terre n'est que un 2 300 000 000e du rayonnement total.

Si la chaleur émise par le soleil était employée à fondre une couche de glace déposée à la surface du soleil, elle liquéfierait cette glace dans la proportion d'une épaisseur de 732 mètres par heure. Elle ferait bouillir, par heure, 2 900 millions de myriamètres cubes d'eau à la température de la glace. Exprimée sous une autre forme, la chaleur émise par le soleil en une heure est égale à celle qui serait engendrée par la combustion d'une couche de houille, épaisse de 3 mètres, et entourant entièrement le soleil; la chaleur émise par lui en un an est égale à celle qui serait produite par la combustion d'une couche de houille de 27 kilomètres d'épaisseur.

Tels sont les résultats de mesures directes; et alors même qu'on réduirait les chiffres qui précèdent, en procédant à de nouvelles déterminations avec une précision plus grande, on ne leur enlèverait pas ce qu'ils ont d'incroyable. Et cette dépense de chaleur a déjà eu lieu pendant des siècles, sans qu'il nous soit possible, depuis les temps historiques, de découvrir une diminution sensible. Quand on entend d'une certaine distance une cloche mise en branle, le son de chaque coup cesse bientôt, ses vibrations sonores sont rapidement éteintes, et de nouveaux coups sont nécessaires pour maintenir le son. Comme la cloche,

> Le soleil résonne comme il résonnait autrefois.
> Die Sonne tönt nach alter Weise.

Mais comment sa résonnance se soutient-elle? Comment ses pertes continuelles sont-elles réparées? Le merveilleux ne nous frappe pas quand nous le rencontrons dans les conditions ordinaires de la vie. Il est possible qu'à plusieurs d'entre nous, et même à quelques-uns des plus éclairés parmi nous, le soleil apparaisse comme un feu, ne différant de nos feux terrestres que par la grandeur et l'intensité de sa combustion. Mais quelle matière combustible est capable de se conserver ainsi? Tout ce que nous connaissons des phénomènes cosmiques annonce notre parenté avec le soleil, et affirme que les mêmes principes constituants que la chimie nous a déjà fait connaître, entrent dans la composition de sa masse. Or, aucune des substances ter-

restres que nous connaissons, aucune des substances que la chute des météores a apportées sur la terre, ne serait capable de maintenir la combustion du soleil L'énergie chimique de ces substances serait trop faible, et elles se dissiperaient trop vite dans l'espace. Si le soleil était un bloc de houille, et qu'on l'approvisionnât assez d'oxigène pour le rendre capable de brûler au degré nécessaire à produire la radiation observée, il serait entièrement consumé en 5 000 ans. D'un autre côté, si l'on admet que le soleil est un corps pourvu à son origine d'une provision de chaleur, un globe en cours de refroidissement, il faudra nécessairement lui attribuer des qualités totalement différentes de celles que possède la matière terrestre. Si nous connaissions la chaleur spécifique du soleil, nous pourrions calculer la vitesse de son refroidissement. En supposant qu'il ait la même chaleur spécifique que l'eau, celle des substances terrestres qui possède la chaleur spécifique la plus élevée, au taux actuel de sa radiation, la masse totale du soleil se refroidirait de 8 500 degrés en 5000 ans. En un mot, si le soleil est formé de matières semblables à celles de la terre, il faut absolument qu'il existe pour lui quelque moyen de réparer ses pertes.

Ces faits sont si extraordinaires que la plus timide des hypothèses que l'on pourrait mettre en avant pour les expliquer serait encore extravagante. Nous savons que le soleil tourne sur son axe comme une roue, et fait un tour en 25 jours environ; serait-ce le frottement de la périphérie de cette roue contre quelque matière environnante, qui produirait la lumière et la chaleur? Cette opinion a été soutenue. Mais quel est le frein qui détermine ce frottement, et par quel mécanisme est-il constamment pressé contre la surface solaire? Ce mode d'action est inconcevable; mais, en admettant l'existence de ce frein impossible, nous pouvons calculer la somme de chaleur que le soleil pourrait engendrer par un semblable frottement. Nous connaissons sa masse, nous savons la durée de sa rotation, nous connaissons l'équivalent mécanique de la chaleur; et de ces données nous déduisons, avec certitude, que sa force totale de rotation, convertie en chaleur, suffirait à compenser la perte

due à sa radiation pendant plus d'un siècle, mais pendant moins de deux siècles[1]. Il n'y a rien d'hypothétique dans ce calcul.

Il est une autre théorie qui, si hardie qu'elle puisse paraître à première vue, mérite notre plus sérieuse attention. Je lui ai déjà fait allusion sous le nom de Théorie météorique de la chaleur du soleil. Les espaces solaires sont peuplés de corps pondérables; la proposition célèbre de Kepler que « il y a plus de comètes dans le ciel que de poissons dans l'Océan, » est déduite du fait qu'une petite partie seulement du nombre total des comètes appartenant à notre système sont aperçues de la terre. Mais en outre des comètes, des planètes, et des satellites ou lunes, il est une classe nombreuse de corps appartenant à notre système, ce sont les astéroïdes qui, à cause de leur petitesse, peuvent être regardés comme des atomes cosmiques. De même que les planètes et les comètes, ces petits corps obéissent à la loi de la gravité; ils tournent autour du soleil dans des orbites elliptiques; et ce sont eux qui, lorsqu'ils pénètrent dans l'atmosphère de la terre, s'enflammant par le frottement, nous apparaissent sous forme de météores, bolides ou étoiles filantes.

Dans une nuit brillante, il se passe rarement 20 minutes, en un lieu quelconque de la surface de la terre, sans l'apparition d'au moins un météore. A certaines époques (le 10 août et le 13 novembre) ils apparaissent en nombre prodigieux. Pendant neuf heures d'observation à Boston, où ils tombaient comme des flocons de neige d'après la description qu'on en a donnée, on a calculé que le nombre des météores observés avait atteint 240 000. Le nombre total de météores qui brillent dans une année s'élève peut-être à des centaines ou même à des milliers de millions, et cependant ce n'est là encore qu'une petite partie de la multitude d'astéroïdes qui circulent autour du soleil. Les phénomènes de la lumière et de la chaleur, comme aussi les observations directes de la comète de Encke nous ont conduit à admettre que l'univers est rempli par un milieu résistant, lequel, par le frottement qu'il exerce, rapproche graduellement du soleil toutes les

[1] Ce qui suit est résumé de M. Mayer. *Dynamik des Himmels*, p. 10.

masses de notre système. Et quoique les planètes depuis les temps historiques, ne montrent pas de diminution sensible dans les durées de leurs révolutions, on ne peut pas en dire autant des corps plus petits. Pendant le temps qui serait nécessaire pour diminuer d'un seul mètre la distance moyenne de la terre au soleil, un petit astéroïde peut s'être rapproché de plusieurs milliers de kilomètres de notre centre de lumière.

Ces réflexions nous amènent à conclure que tandis que ce courant incommensurable de matière pondérable coule incessamment vers le soleil, il doit augmenter de densité à mesure qu'il approche du centre vers lequel tout converge. Et de là naît naturellement la conjecture, que cette lumière nébuleuse, faible mais de dimensions énormes, qui entoure le soleil, *la lumière zodiacale*, peut devoir son existence à ce courant si serré de masses météoriques. Quoiqu'il en soit, il est au moins prouvé que ce phénomène lumineux a sa source dans une matière qui circule conformément aux lois du système planétaire; que la masse totale qui constitue la lumière zodiacale doit se rapprocher constamment du soleil, et tomber incessamment à sa surface comme une sorte de pluie.

Nous observons la chute d'une pomme et nous cherchons la loi qui régit son mouvement. A la place de la terre nous mettons le soleil, à la place de la pomme nous mettons la terre, et nous entrons ainsi en possession de la clef du mécanisme des cieux. Nous connaissons déjà la liaison qui existe entre la hauteur de la chute, et la chaleur développée par un corps qui tombe à la surface de la terre. A la place de la terre mettons le soleil, avec une masse égale à 300 000 fois celle de la terre; au lieu d'une chute de quelques mètres, prenons des chutes correspondantes à des distances cosmiques, et rien ne nous manquera pour engendrer une chaleur qui surpasse toutes les chaleurs terrestres.

Il est aisé de calculer le maximum et le minimum de la vitesse communiquée par l'attraction du soleil à un astéroïde qui circule autour de lui; le maximum est engendré lorsque le corps s'approche en ligne droite du soleil, venant d'une distance infinie; puisqu'alors la force entière de l'attraction s'est exercée sur lui

sans perte aucune; le minimum est la vitesse qui serait simplement capable de faire tourner autour du soleil un corps tout à fait voisin de sa surface. La vitesse finale du premier corps, au moment où il va frapper le soleil, serait de 627 kilom. par seconde, celle du second de 444 kilomètres. L'astéroïde, en frappant le soleil avec la première vitesse, développerait plus de 9 000 fois la chaleur engendrée par la combustion d'une masse égale de houille; le choc, dans le second cas, engendrerait une chaleur égale à celle de la combustion de plus de 4 000 masses semblables de houille. Il n'est donc nullement nécessaire que les substances qui tombent sur le soleil soient combustibles; leur combustibilité n'ajouterait pas sensiblement à l'épouvantable chaleur produite par leur collision ou choc mécanique.

Nous avons donc ici un mode de génération de chaleur suffisant pour rendre au soleil son énergie à mesure qu'il la perd, et pour maintenir à sa surface une température qui surpasse celle de toutes les combustions terrestres. Les qualités propres des rayons solaires, et leur pouvoir de pénétration incomparable, nous autorisent à conclure que la température de leur origine doit être énorme; or, nous trouvons dans la chute des astéroïdes les moyens de produire cette température excessive. On peut objecter que cette pluie de matière devrait être accompagnée d'un accroissement du volume du soleil; cela est vrai, mais la quantité de matière nécessaire à produire la radiation observée, quand même elle se serait accumulée pendant quatre mille ans, échapperait entièrement à l'examen fait avec nos instruments les plus puissants. Si la terre tombait sur le soleil, l'accroissement de volume qu'elle produirait serait tout à fait imperceptible; et cependant la chaleur engendrée par son choc couvrirait la dépense faite en un siècle par le soleil.

Appliquons à la terre elle-même des considérations semblables à celles que nous avons appliquées au soleil. La théorie de la gravitation de Newton, qui nous permet de déduire, de la forme actuelle de notre terre, son état primitif d'agrégation, nous révèle en même temps une source de chaleur assez puissante pour amener à l'état fluide, assez puissante même pour fondre des mondes.

Elle nous apprend à regarder l'état de fusion d'une planète comme résultant de la liaison mécanique entre les masses cosmiques, et ramène ainsi à une seule et même origine, et la chaleur mise en réserve dans la masse de la terre et la chaleur émise par le soleil.

Sans doute que la surface entière du soleil est un océan non interrompu de matière fluide enflammée. Sur cet océan repose une atmosphère de gaz incandescents, une atmosphère de flamme, ou photosphère. Mais les substances gazeuses, comparées aux substances solides, même alors que leur température est très-élevée, émettent une lumière relativement faible et transparente ; il est donc probable que la lumière blanche et éblouissante du soleil vient à travers son atmosphère, des parties plus solides de la surface[1].

Il est une autre considération qui se rattache à la permanence des conditions actuelles de notre terre, et qui est très-digne de notre attention. Placés sur un des ponts de Londres, nous observons que le courant de la Tamise est deux fois renversé, ou que ses eaux remontent deux fois par jour. L'eau, mise ainsi en mouvement, frotte contre le lit et les bords de la rivière, et ce frottement engendre de la chaleur. La chaleur, ainsi engendrée, est en partie rayonnée vers l'espace, et c'est autant de perdu pour la terre. Qu'est-ce qui compense cette perte incessante? La rotation de la terre. Étudions cette question d'un peu plus près. Concevons que la lune soit fixe et que la terre tourne comme une roue, de l'ouest à l'est, dans sa rotation diurne. Une montagne de la terre, en s'approchant du méridien de la lune, se trouve comme saisie par la lune, et devient une sorte de manivelle par laquelle la terre est sollicitée à tourner plus vite. Mais quand la montagne a passé le méridien, l'action de la lune s'exerce en sens contraire, et tend à diminuer la vitesse de rotation autant qu'elle l'augmentait auparavant; et c'est ainsi que

[1] Je cite ici Mayer, mais c'est exactement l'opinion soutenue par M. Kirchhoff. Nous voyons la masse solide ou liquide du soleil *à travers* sa photosphère.

l'action exercée par la lune sur tous les corps fixés à la terre se trouve annulée ou neutralisée.

Mais admettons que la montagne reste *toujours* située à l'est du méridien de la lune, alors l'attraction du satellite s'exercera toujours dans le sens opposé à la rotation de la terre, dont la vitesse diminuera par conséquent, d'une quantité proportionnelle à l'intensité de l'attraction. *La marée occupe cette position*; elle est toujours située à l'est du méridien de la lune; les eaux de l'océan sont, en partie, traînées comme un frein sur la surface de la terre, et, comme un frein, elles doivent diminuer la vitesse de la rotation de la terre. Cette diminution, quoique inévitable, est cependant trop faible pour avoir pu se rendre sensible pendant la période à laquelle s'étendent nos observations sur ce sujet. En supposant donc que nous fassions tourner un moulin par l'action de la marée, et que nous produisions de la chaleur par le frottement des meules, cette chaleur aurait une origine totalement différente de celle de la chaleur produite par une autre paire de meules que ferait tourner le ruisseau descendu de la montagne. La première est produite aux dépens de la rotation de la terre; la seconde aux dépens de la radiation solaire qui a porté à sa source le ruisseau du moulin [1].

Ce qui précède est un aperçu de la théorie météorique de la chaleur solaire, emprunté à l'*Essai sur la dynamique céleste* de M. Mayer. Je m'en suis tenu rigoureusement à ses énoncés; et, dans la plupart des cas, j'ai simplement traduit ses paroles. Mais cet aperçu ne donne pas une idée adéquate de la fermeté et de la sûreté avec lesquelles il a appliqué ses principes. Il met en jeu les causes vraies des phénomènes; et il ne peut rester de doute dans l'esprit que relativement à la quantité d'action qu'il assigne à chacune de ces causes. Je ne me fais pas le garant de cette théorie, et je ne vous demande pas de l'accepter comme absolument démontrée; cependant la regarder comme chimérique serait se tromper grandement. C'est une noble spéculation; et, croyez-moi, la vraie théorie, si celle-ci, ou quelque

[1] *Dinamik des Himmels*, p. 38, etc.

point de celle-ci, se trouve en défaut, ne sera en elle-même ni moins étrange ni moins étonnante [1].

M. Mayer publia son *Essai* en 1848; cinq ans après, M. Waterston esquissa, de son côté, et indépendamment, une théorie semblable, dans une des séances de l'Association britannique, réunie à Hull. Les *Transactions* de la Société royale d'Édimbourg pour 1854 contiennent un très-beau mémoire dans lequel M. le professeur William Thomson développe la théorie esquissée par M. Waterston. Il admet que les météores qui devront servir à l'approvisionnement actuel de la lumière solaire se trouvent principalement en dedans de l'orbite de la terre, et que nous les voyons dans la lumière zodiacale, « une *pluie illuminée,* » ou mieux « un tourbillon de pierres » (Herschel, § 897). C'est précisément la source d'énergie indiquée d'abord par M. Mayer. « En conséquence donc, écrit M. le professeur Thomson, la source de l'énergie d'où dérive la chaleur solaire est indubitablement météorique... La principale de ces sources, et peut-être la seule appréciable et efficace, est dans les corps qui actuellement circulent autour du soleil, à l'intérieur de l'orbite terrestre, et qui sont probablement aperçus dans l'appendice lumineux appelé par nous *lumière zodiacale.* L'approvisionnement d'énergie pour

[1] Pendant que je préparais ces feuilles pour l'impression, j'ai eu l'occasion de relire encore une fois les écrits de Mayer, et cette seconde lecture a fait revivre tout l'intérêt que m'avait inspiré la première. M. le docteur Mayer était médecin-praticien à Heilbronn, petite ville de l'Allemagne; en 1840, il fit l'observation que le sang veineux des fiévreux sous les tropiques est plus rouge que sous des latitudes plus septentrionales. Partant de ce fait, quoique engagé dans les devoirs de sa laborieuse profession, et, à ce qu'il paraît, sans un ami savant qui le soutînt et qui l'encourageât, Mayer atteignit dans ses conceptions le niveau élevé qui ressort des citations de ses ouvrages, si nombreuses dans ce volume. Il publia en 1842 son premier mémoire *sur les forces de la nature inorganique;* en 1845, son *Mouvement Organique;* en 1848, sa *Dynamique céleste.* Après cela sa tête surchargée de travail s'égara, et un nuage couvrit cette intelligence qui avait accompli de si grandes choses. L'éclipse ne fut néanmoins que passagère; aujourd'hui, M. le docteur Mayer est rétabli. Je ne l'ai jamais vu; aucune ligne de correspondance n'a été échangée entre nous. Il a fait son œuvre modestement et sans bruit; et après avoir parlé de ses mérites, comme l'occasion m'en faisait un devoir, je laisse avec confiance à l'histoire le soin de sa renommée.

la lumière solaire dans l'avenir est maintenant en partie dynamique, les mouvements de ces corps autour du soleil; en partie potentielle, leur gravitation vers le soleil. Cette seconde portion est graduellement employée, moitié à vaincre la résistance du milieu, moitié à produire un accroissement continuel de la première. Chaque météore se meut de plus en plus vite et se rapproche de plus en plus du centre, jusqu'à ce que, à un moment donné et très-soudainement, il s'embarrasse tellement dans l'atmosphère solaire qu'il commence à perdre sa vitesse. Quelques secondes plus tard, il est au repos à la surface du soleil; et l'énergie qu'il engendre s'échappe sous forme de vibrations vers les lieux où elle était en réserve depuis tant de siècles, pour s'élancer enfin, sous forme de lumière et de chaleur, vers les régions les plus reculées de l'espace. »

J'extrais des tables publiées par M. le professeur Thomson, les données intéressantes qui suivent : En premier lieu, les quantités de chaleur équivalentes à la rotation du soleil et des planètes autour de leurs axes, ou qui seraient engendrées, en supposant un frein appliqué à la surface du soleil et des planètes, jusqu'à ce que leur mouvement de rotation fût entièrement arrêté ; en second lieu, les quantités de chaleur dues à la gravitation, c'est-à-dire, qui seraient développées par chacune des planètes, en tombant sur le soleil. Chaque quantité de chaleur est exprimée par le temps, pendant lequel elle pourrait entretenir la radiation solaire.

	Chaleur de gravitation égale à l'émission solaire pendant une période de	Chaleur de rotation égale à l'émission solaire pendant une période de
Soleil		116 ans 6 jours.
Mercure	6 ans 214 jours	15 »
Vénus	83 » 227 »	99 »
La Terre	94 » 303 »	81 »
Mars	12 » 252 »	7 »
Jupiter	32 240 »	14 ans 144 »
Saturne	9 650 »	2 » 127 »
Uranus	1 610 »	71 »
Neptune	1 890 »	

La chaleur de rotation du soleil et des planètes pris ensem-

ble alimenterait la radiation solaire pendant 134 ans; tandis que la chaleur de gravitation produite par la chute sur le soleil, couvrirait les dépenses de cette radiation pendant 45 589 ans.

Il n'y a rien d'hypothétique dans ces résultats; ils découlent directement et nécessairement de l'application de l'équivalent mécanique de la chaleur aux masses cosmiques.

M. Helmholtz a montré que si le système solaire a jamais été une masse nébuleuse d'une extrême ténuité, la force mécanique équivalente à la gravitation mutuelle des particules de cette masse aurait été 454 fois la quantité de force mécanique actuellement disponible dans notre système. Les quatre cent cinquante-trois 454mes de la force issue de la tendance à la gravitation sont déjà dépensés en chaleur. Le 454me qui nous reste, s'il était converti en chaleur, élèverait néanmoins la température d'une masse d'eau, égale en poids au soleil et aux planètes, de 28 millions de degrés centigrades. La chaleur de la lumière de la chaux sur laquelle tombe un jet enflammé d'oxygène ou d'hydrogène est estimée à 2 000 degrés; comment, dès lors, pouvoir se faire une idée d'une chaleur de 28 000 000 de degrés centigrades. Si le système solaire tout entier n'était que de la houille pure, sa combustion totale, n'engendrerait que le 5 500me de cette quantité énorme de chaleur.

« Mais, » poursuit M. Helmholtz, « quoique l'approvisionnement de notre système planétaire soit si immense, qu'il n'ait pas diminué sensiblement malgré la radiation abondante qui a lieu incessamment depuis l'apparition de l'homme sur cette terre ; et que nous soyons tout à fait incapables de mesurer le temps, après lequel il surviendra un changement notable dans les conditions actuelles de notre système planétaire; il n'en est pas moins vrai qu'en vertu des lois inexorables de la mécanique cet approvisionnement, qui ne peut que diminuer et jamais augmenter, sera un jour complétement épuisé, faut-il nous en effrayer? Les hommes sont dans l'habitude de mesurer la grandeur de l'univers, et la sagesse qui y est déployée, par la durée et le bien-être promis à leur propre race; mais l'histoire passée de la terre montre combien est insignifiant l'intervalle écoulé depuis que

l'homme a ici-bas sa demeure. Nous contemplons avec une silencieuse admiration ce que les musées de l'Europe nous montrent des restes de l'Egypte et de l'Assyrie, et nous désespérons de pouvoir reporter nos pensées jusqu'à des époques si reculées. Cependant la race humaine doit avoir existé et s'être multipliée pendant des siècles, avant que les pyramides aient été élevées. Nous estimons à 6 000 ans la durée de l'existence de l'homme; mais si vaste que ce temps puisse nous paraître, qu'est-ce en comparaison des périodes durant lesquelles la terre a nourri les séries successives de plantes et d'animaux gigantesques, en l'absence de l'homme[1]? Périodes durant lesquelles, dans le voisinage de notre ville (Kœnigsberg), l'arbre à ambre fleurissait, et laissait couler sa gomme précieuse sur la terre et dans la mer; alors que dans l'Europe et l'Amérique du Nord prospéraient les forêts de palmiers des tropiques, qui servirent de demeure à des lézards gigantesques, et, après eux, à des éléphants, dont les restes énormes sont encore enfouis dans la terre. Partant de prémisses différentes, plusieurs géologues ont cherché à mesurer la durée de ces premiers âges de la terre : suivant eux elle aurait été de un à neuf millions d'années. Or le temps durant lequel la terre a nourri des êtres organisés, est encore bien court, comparé à la période pendant laquelle elle ne fut qu'un amas de roches fondues. Les expériences de Bischof sur le basalte semblent prouver que pour se refroidir de 2 000° à 200° centigrades, notre globe a eu besoin de 350 millions d'années. Quant à la longueur de temps exigé par la condensation qu'a dû subir la nébuleuse primitive pour arriver à constituer notre système planétaire, elle défie entièrement notre imagination et nos conjectures. L'histoire de l'homme n'est donc qu'une petite ride à la surface de l'immense océan des temps. La persistance d'un état de la nature inorganique favorable à la continuation du séjour de l'homme sur la terre semble assurée pour une période de temps bien plus longue que celle durant laquelle ce monde a déjà été

[1] L'absence de l'homme peut être révoquée en doute (?). Voyez la conclusion de l'article de M. Lubbock sur les habitations des lacs de la Suisse, dans la *natural History Review*.

habité; de sorte que nous n'avons rien à craindre pour nous-mêmes, ni pour de longues générations après nous. Mais ces mêmes forces de l'air, de l'eau, des volcans intérieurs, qui ont produit les anciennes révolutions géologiques, et qui ont enseveli les unes sur les autres plusieurs successions d'êtres vivants, agissent encore sur l'écorce terrestre. Elles amèneront la fin des races humaines, bien plutôt que ne pourraient le faire les changements cosmiques dont nous avons parlé plus haut; et nous forceront peut-être à céder la place à des formes vivantes, nouvelles et plus parfaites, comme l'ichthyosaure et le mammouth ont été remplacés par nous et nos contemporains. »

Si grandes et si merveilleuses cependant que soient ces questions relatives à la constitution physique du soleil, elles ne sont qu'une partie des merveilles qui se rattachent à l'astre qui nous éclaire. Il reste à considérer ses rapports avec la vie. L'atmosphère de la terre contient de l'acide carbonique, et la surface de la terre fait germer des plantes vivantes; celui-là est la nourriture de celles-ci. Les plantes semblent s'emparer du carbone et de l'oxygène combinés; elles les séparent, gardent le carbone et mettent l'oxygène en liberté. Les plantes n'exercent pas cette puissance d'assimilation en vertu d'une force spéciale différente par ses qualités intrinsèques des autres forces de la nature: le vrai magicien est encore ici le soleil. Nous avons vu dans des leçons précédentes (voyez, leçon V.) comment la chaleur se consomme en séparant les atomes et les molécules des solides et des liquides; comment elle passe à l'état d'énergie potentielle pour reparaître sous forme de chaleur, quand les attractions des atomes séparés sont de nouveau mises en jeu. Or, ces mêmes considérations, précisément, que nous appliquions alors à la chaleur, nous avons maintenant à les appliquer à la lumière; car c'est aux dépens de la lumière solaire que s'opère la décomposition de l'acide carbonique. Sans le soleil la réduction n'aurait pas lieu, et elle exige une dépense de lumière solaire exactement égale au travail moléculaire accompli. C'est ainsi que s'élèvent les arbres, c'est ainsi que verdissent les prairies, c'est ainsi que les fleurs s'épanouissent. Que les rayons solaires

tombent sur une surface de sable, le sable est échauffé, et, finalement, il rend par rayonnement autant de chaleur qu'il en a reçue. Que ces mêmes rayons tombent sur une forêt, la quantité de chaleur rendue sera inférieure à la quantité reçue, parce que l'énergie d'une portion du faisceau lumineux est employée à faire grandir les arbres [1]. J'ai ici un écheveau de coton, j'y mets le feu; il s'enflamme et engendre une quantité déterminée de chaleur; or c'est précisément la quantité de chaleur ravie au soleil pour former cet écheveau de coton. Ce n'est là qu'un exemple entre mille autres; chaque arbre, chaque plante, chaque fleur croît et fleurit par la grâce et la bonté du soleil.

Mais comment nous arrêterions-nous à la vie végétale, qui est la source médiate ou immédiate, de toute vie animale. Dans le corps de l'animal les substances végétales arrivent de nouveau en contact avec leur oxygène bien aimé, et elles brûlent en nous, comme le charbon brûle sur une grille. La chaleur née de cette combustion est la source de toute la puissance des animaux; et les forces mises ici en jeu sont encore les mêmes, quand au genre, que celles qui opèrent dans la nature inorganique. Dans la plante le ressort est monté, dans l'animal il se détend. Dans la plante les atomes se séparent, dans l'animal ils se combinent de nouveau. Autant il est certain que la force qui met la montre en mouvement dérive de la main qui l'a remontée, autant il est certain que toute puissance terrestre découle du soleil. Sans tenir compte des éruptions des volcans, du flux et du reflux des mers, chaque action mécanique exercée à la surface de la terre, chaque manifestation de puissance, organique et inorganique, vitale ou physique a son origine dans le soleil [2]. Sa chaleur maintient la mer à l'état liquide et l'atmosphère à l'état gazeux; et toutes les tempêtes qui les agitent l'une et l'autre sont soufflées par sa force mécanique. Il attache aux flancs des montagnes les sources

[1] Mayer, *Die organische Bewegung*, p. 39.

[2] Le germe, bien plus que le germe de tout ceci, se trouve dans un paragraphe des *Outlines of Astronomie* de sir John Herschel, publiés en 1833.

des rivières et les glaciers; et, par conséquent, les cataractes et les avalanches se précipitent avec une énergie qu'elles tiennent immédiatement de lui. Le tonnerre et les éclairs sont à leur tour une transformation de sa puissance. Tout feu qui brûle et toute flamme qui brille dispensent une lumière et une chaleur qui a appartenu originairement au soleil. Dans ces jours, hélas, force nous est de nous familiariser avec les nouvelles des champs de batailles; or, chaque charge de cavalerie, chaque choc entre deux corps d'armée est l'emploi ou l'abus de la force mécanique du soleil. Le soleil vient à nous sous forme de chaleur, il nous quitte sous forme de chaleur; mais entre son arrivée et son départ il a fait naître les puissances multiples de notre globe; elles sont toutes des formes spéciales de la puissance solaire; autant de moules dans lesquels celle-ci est entrée temporairement, en allant de sa source vers l'infini.

Présentées à notre esprit sous leur véritable aspect, les découvertes et les généralisations de la science moderne constituent le plus sublime des poëmes qui se soit jamais offert à l'intelligence et à l'imagination de l'homme. Le physicien de nos jours est sans cesse en contact avec un merveilleux qui ferait pâlir celui de Milton. Il est si grandiose et si sublime qu'il faut à celui qui s'y livre une certaine force de caractère pour se préserver de l'éblouissement. Considérez l'ensemble des énergies de notre monde, la puissance emmagasinée dans nos houillères; nos vents et nos rivières; nos flottes, nos armées, nos canons. Que sont-ils? Ils sont tous engendrés par une portion de l'énergie du soleil, qui ne s'élève pas à un 2 320 000 000me de l'énergie totale. Telle est, en effet, toute la fraction de la force du soleil absorbée par la terre, et encore nous ne convertissons qu'une petite fraction de cette fraction en pouvoir mécanique. En multipliant toutes nos énergies par des millions de millions, nous n'arriverons pas à représenter la dépense de chaleur du soleil. Et malgré cet immense écoulement, qui n'a pas cessé un instant depuis l'apparition de l'homme; il nous serait impossible de constater une diminution même infiniment petite de son approvisionnement. Mesuré à nos échelles terrestres les plus grandioses un semblable réservoir d'énergie apparaît rigoureuse-

ment infini; mais c'est un des priviléges de notre nature que de pouvoir réduire les mesures humaines à de minimes proportions, au point de ne plus voir dans le soleil lui-même qu'un point au sein de l'infini, qu'une simple goutte dans l'océan universel. Nous analysons l'espace dans lequel il se noie, et qui est le véhicule de sa puissance. Nous nous élançons vers d'autres systèmes et d'autres soleils, dont chacun répand son énergie comme le nôtre, mais toujours sans infraction à la loi, qui voit l'immutabilité dans le changement, qui admet des transformations et des conversions incessantes, mais sans gain ni perte finale. Cette loi est la généralisation inattendue de l'aphorisme de Salomon : qu'*il n'y a rien de nouveau sous le soleil*, en ce sens qu'elle nous apprend à retrouver partout, la même puissance primitive dans l'infinie variété de ses manifestations. On ne peut rien ajouter à la nature; on n'en peut rien retrancher; la somme de ses énergies est constante, et tout ce que l'homme peut faire dans la recherche de la vérité physique, ou dans ses applications des sciences physiques, c'est de changer de place les parties constituantes d'un tout qui ne varie jamais ; et avec l'une d'elles d'en former une autre. La loi de conservation exclut rigoureusement et la création et l'annihilation ; la grandeur peut être substituée au nombre et le nombre à la grandeur; des astéroïdes peuvent s'agglomérer en soleils, des soleils peuvent se résoudre en flores et en faunes ; les flores et les faunes peuvent se dissiper en gaz ; la puissance en circulation est perpétuellement la même. Elle roule en flots d'harmonie à travers les âges ; et toutes les énergies de la terre, toutes les manifestations de la vie, aussi bien que le déploiement des phénomènes, ne sont que des modulations ou des variations d'une même mélodie céleste.

APPENDICE A LA LEÇON XII

Pour diverses raisons, je tiens à ce que ce livre comprenne tout ce j'ai écrit sur la part que M. le docteur Mayer a prise à la théorie dynamique de la chaleur. Voilà pourquoi je reproduis ici en premier lieu un extrait d'une leçon sur la force que j'ai faite à l'Institution royale dans la soirée du vendredi 6 juin 1862, et qui a été publiée dans les comptes rendus de l'Institution, comme aussi dans le *Philosophical magazine.*

SUR LA FORCE

La circonstance de l'Exposition internationale a suggéré à notre honorable secrétaire l'idée de consacrer après Pâques les soirées des vendredis de la présente année à discourir sur les divers agents sur lesquels repose la force matérielle de l'Angleterre. Il a désiré que le fer, le charbon, le coton et les matériaux analogues, fussent tour à tour l'objet de ces entretiens; après avoir ouvert lui-même cette série de conférences par un discours sur la grande Exposition elle-même, il m'a invité à la clore par un discours sur la *force* en général. Il y avait déjà plusieurs mois que mes pensées s'étaient portées à divers intervalles sur ce sujet important, et j'avais arrêté le plan que je devais suivre en le traitant; mais trois semaines avant le jour marqué pour ma conférence, je fus amené à m'écarter de mon plan primitif par des raisons que je fais connaître à la fin de ce discours.

Nous avons tous une idée plus ou moins nette de la force ; nous savons tous d'une manière générale ce que signifie l'expression force musculaire; et chacun de nous accepterait moins volontiers le coup de

poing d'un boxeur qu'une chiquenaude des doigts d'une dame. Mais ces idées générales ne nous suffisent pas; il faut que nous apprenions à exprimer numériquement la valeur mécanique de ces deux coups; c'est le premier point que nous avons à éclaircir.

Une sphère de plomb du poids d'un kilogramme était suspendue à cinq mètres au-dessus du parquet. On l'a rendue libre, et elle est tombée par la pesanteur. Ce poids a mis exactement une seconde pour tomber sur la terre de la hauteur à laquelle il était placé, et, au moment où il a touché la terre, il était animé d'une vitesse de dix mètres par seconde; c'est-à-dire que, si, à cet instant, la terre avait été anéantie et son attraction annulée, le poids aurait continué à se mouvoir dans l'espace avec une vitesse uniforme de dix mètres par seconde.

Supposons qu'au lieu d'être entraîné en bas par la pesanteur, le poids soit projeté en haut, en sens contraire de l'action de la pesanteur, avec quelle vitesse devra-t-il quitter la surface de la terre pour atteindre une hauteur de cinq mètres? Avec la vitesse de dix mètres par seconde. Cette vitesse, imprimée au poids par un bras humain ou par un autre agent mécanique lui ferait atteindre précisément la hauteur d'où il est tombé.

Cela posé, l'élévation du poids doit être considérée comme un travail mécanique. Je puis placer une échelle contre le mur et élever le poids en le portant moi-même à la hauteur de cinq mètres. Je puis aussi l'élever à cette hauteur en m'aidant d'une poulie et d'une corde: je puis enfin le projeter soudainement à cette même hauteur de cinq mètres. La quantité de travail fait dans tous les cas, en tant qu'il s'agit de l'élévation du poids, est absolument la même. En effet, la quantité absolue du travail fait dépend seulement de deux choses : premièrement de la quantité de matière soulevée, et secondement de la hauteur à laquelle elle est élevée. Si vous appelez m la quantité de matière ou sa masse, et h la hauteur à laquelle elle est élevée, le produit de m par h ou mh exprimera la quantité de travail fait.

En supposant maintenant qu'au lieu d'imprimer au poids une vitesse de 5 mètres par seconde, nous lui imprimions une vitesse double ou de 10 mètres par seconde, à quelle hauteur s'élèvera-t-il? Peut-être seriez-vous tenté de répondre : à deux fois la hauteur première. Mais ce serait tout à fait incorrect. La théorie et l'expérience nous apprennent que le poids s'élèvera à une hauteur quatre fois plus grande; au lieu de 2 fois 5 ou 10 mètres, il atteindra une hauteur égale à 4 fois 5 ou 20 mètres. De même, si nous triplons la vitesse de départ, le poids atteindra une hauteur 9 fois plus grande; si nous

la quadruplons, il atteindra une hauteur 16 fois plus grande. En admettant enfin que nous fassions sa vitesse de départ 7 fois plus grande, nous élèverons le poids à une hauteur 49 fois plus grande ou de 245 mètres.

Maintenant, le travail fait, ou ce que l'on appelle quelquefois l'*effet mécanique*, comme on l'a expliqué plus haut, est proportionnel à la hauteur; et comme une vitesse double répond à une hauteur quadruple, une vitesse triple à une hauteur neuf fois plus grande, et ainsi de suite, il est parfaitement clair que l'effet mécanique croît comme le carré de la vitesse. Si la masse du corps est représentée par la lettre m, et la vitesse par v, l'effet mécanique sera alors représenté par mv^2. Dans le cas que nous avons considéré, le poids était lancé en haut, et il n'avait à vaincre dans son élévation que la résistance de la pesanteur; mais ce que nous avons dit subsisterait de la même manière, si le poids avait eu à vaincre la résistance de l'eau, de la vase, de la terre, du bois ou d'un autre milieu quelconque, dans lequel nous voudrions le faire pénétrer. Si, par exemple, vous doublez la vitesse d'un boulet de canon, vous quadruplerez son effet mécanique. De là naît la nécessité d'augmenter la vitesse du projectile, et la logique qui a conduit sir William Armstrong à employer des charges de poudre de 25 kilogrammes dans ses récentes et mémorables expériences.

La mesure de l'effet mécanique ou du travail est dans le produit de la masse du corps par le carré de la vitesse.

Lorsqu'on lance une balle contre une cible très-résistante, on constate qu'après le choc elle est souvent brûlante. M. Fairbairn m'a appris que dans les expériences de Shoeburyness, c'est chose commune que de voir jaillir un éclair de lumière, même en plein jour, au moment où le boulet touche la cible. Et si j'examine mon poids de plomb après qu'il est tombé de la hauteur à laquelle il était suspendu, je trouve aussi qu'il s'est échauffé. Cela posé, l'expérience comme le raisonnement nous conduisent à cette loi remarquable que la quantité de chaleur engendrée, de même que l'effet mécanique, est proportionnelle au produit de la masse par le carré de la vitesse. Doublez la masse, toutes les autres choses restant les mêmes, et vous doublerez votre quantité de chaleur engendrée; doublez la vitesse, tout restant d'ailleurs le même, et vous quadruplerez votre quantité de chaleur. Ici donc nous avons destruction ou extinction du mouvement mécanique ordinaire, avec production de chaleur. Je prends cet archet de violon; et je le fais passer en frottant sur les cordes; vous entendez le son, ce son est dû au mouvement imprimé à l'air; et, pour produire ce

mouvement, il m'a fallu dépenser une partie de la force musculaire de mon bras. Nous pourrions dire, dans un sens très-correct qu'ici la force mécanique de mon bras est convertie en musique. Et nous disons, d'une manière semblable, que le mouvement empêché de notre poids qui tombe, ou le mouvement arrêté du boulet de canon est converti en chaleur. Le mode de mouvement a changé, mais c'est toujours le mouvement continué : le mouvement de la masse est converti en mouvement des atomes de la masse ; et ces petits mouvements atomiques transmis aux nerfs produisent la sensation que nous appelons chaleur. Nous connaissons, en outre, la quantité de chaleur qu'une quantité donnée de force mécanique peut développer. Notre boulet de plomb, par exemple, en tombant sur la terre, engendre une quantité de chaleur suffisante à élever la température de sa propre masse des trois neuvièmes ou du tiers d'un degré centigrade. Il atteint la terre avec une vitesse de 10 mètres par seconde, et 40 fois cette vitesse serait encore une petite vitesse pour la balle d'une carabine rayée : multipliant 155 par le carré de 40, nous trouvons que la quantité de chaleur développée par le choc de la balle contre la cible, si on la concentrait tout entière dans le plomb dont la balle est formée, élèverait sa température à 535 degrés. Cette élévation de température serait plus que suffisante pour faire fondre le plomb. Dans la réalité, la chaleur développée est partagée entre le plomb et le corps qu'il frappe : néanmoins il sera intéressant d'examiner, dans l'occasion, si les balles des carabines rayées ne donneraient pas quelquefois des signes de fusion.

Du mouvement des masses sensibles, déterminé par la pesanteur ou autrement, passons au mouvement des atomes s'élançant les uns sur les autres, entraînés par l'affinité. Un ballon en collodion rempli d'un mélange de chlore et d'hydrogène était suspendu au foyer d'un miroir parabolique, et l'on faisait jaillir instantanément une très-forte lumière électrique au foyer d'un second miroir placé à 7 mètres du premier : à l'instant où la lumière tombait sur le ballon, les atomes qu'il renfermait se jetaient les uns sur les autres, et le résultat de leur combinaison était de l'acide chlorydrique. La combustion du charbon dans l'oxygène est une vieille expérience ; mais elle a aujourd'hui une explication transcendante qu'elle n'avait pas autrefois. Nous regardons l'acte de la combinaison entre les atomes de l'oxygène et du charbon, comme étant de même ordre que l'acte de la chute d'un poids ou de son choc contre la terre ; et la chaleur produite dans les deux cas peut se rapporter à une cause commune. Ce diamant en-

flammé qui brille dans l'oxygène comme une étoile de lumière blanche, s'enflamme et brûle par suite de la chute sur lui des atomes d'oxygène. Et si nous pouvions mesurer la vitesse de ces atomes à l'instant du choc, comme aussi leur nombre et leur poids, en multipliant la masse de chaque atome par le carré de la vitesse, et ajoutant tous ces produits, nous obtiendrions un nombre qui représenterait la quantité de chaleur développée par l'union de l'oxygène et du carbone.

Jusqu'ici nous avons considéré la chaleur développée par le choc des masses de volume sensible et des atomes. On dépensait du travail pour donner le mouvement à ces atomes ou à ces masses, et de la chaleur était dégagée. Mais nous renversons chaque jour cette manière de procéder, et nous engendrons du travail en dépensant de la chaleur. Nous pouvons élever un poids par la chaleur, et nous possédons dans le calorique une provision énorme de pouvoir mécanique. Ce demi-kilogramme de charbon que je tiens dans ma main produit, par sa combinaison avec l'oxygène, une quantité de chaleur, laquelle, appliquée mécaniquement, suffirait à élever un poids de 50 kilogrammes à une hauteur de 30 kilomètres au-dessus de la surface de la terre. Réciproquement un poids de 50 kilogrammes tombant d'une hauteur de 30 kilomètres, engendrerait par son choc contre la terre une quantité de chaleur égale à celle qui est développée par la combustion d'un demi-kilogramme de charbon. Partout où du travail est produit par la chaleur, la chaleur disparaît. Un canon qui lance un boulet est moins échauffé que le canon qui a tiré à blanc avec une gargousse sans boulet.

La quantité de chaleur communiquée au générateur d'une machine à vapeur en travail est plus grande que celle qui résulterait de la condensation de la vapeur, après qu'elle a fait son travail; et la quantité de travail exécuté est l'équivalent exact de la quantité de chaleur perdue. On extrait annuellement des mines de l'Angleterre 84 millions de tonnes de charbon. La quantité de force mécanique, représentée par cette quantité de charbon, est vraiment fabuleuse. La combustion d'un seul kilogramme de charbon, en supposant qu'elle eût lieu dans une minute, serait équivalente au travail de 600 chevaux, et si nous supposions 108 millions de chevaux travaillant jour et nuit avec une énergie toujours la même pendant une année, leurs efforts réunis auraient pour résultat une quantité de travail justement égale à celle que le produit annuel de nos houillères nous mettrait à même d'accomplir.

Quand on compare l'énergie de la force avec laquelle le carbone et

l'oxygène s'unissent ensemble à l'énergie de la pesanteur ou de la gravitation ordinaire, l'affinité chimique apparaît presque infinie. Mais laissons à la gravité son plein jeu ; permettons-lui de s'exercer dans toute sa sphère d'action. Plaçons un corps à une distance assez grande pour que l'attraction de la terre soit à peine sensible, et laissons-le tomber de cette distance sur la terre. Il atteindra la terre avec une vitesse finale d'environ 11 200 mètres par seconde, et par son choc contre la terre, il engendrera plus de deux fois la quantité de chaleur que son poids de charbon pourrait développer en brûlant. Nous avons établi que, par sa chute à travers un espace de 15 mètres, la température de notre boulet de plomb s'élèverait du tiers d'un degré centigrade, mais un corps tombant d'une distance infinie a déjà usé 1 299 999 parties des 1 300 000 parties du pouvoir attractif de la terre, lorsqu'il arrive à 5 mètres de distance de sa surface ; et pendant ces 5 mètres la terre n'exerce qu'une fraction de son attraction totale égale à $\frac{1}{1\,300\,000}$.

Tournons pour un moment nos pensées de la terre vers le soleil. Les recherches de sir John Herschel et de M. Pouillet nous ont fait connaître la dépense annuelle du soleil en ce qui concerne la chaleur qu'il émet ; et nous pouvons, par un calcul facile, évaluer le montant de la dépense en chaleur qui constitue la part des planètes de notre système. Des 2 300 millions de parties de lumière et de chaleur émises par le soleil, la terre en reçoit une. La chaleur totale émise par le soleil dans une minute suffirait à amener à l'ébullition 49 millions de myriamètres cubes d'eau à la température de la glace fondante. Comment cette perte énorme est-elle réparée ? D'où vient la chaleur du soleil et par quel moyen est-elle maintenue constante ? Aucune des combustions, aucune des affinités chimiques que nous connaissons ne serait apte à produire la température de la surface du soleil. En outre, si le soleil était simplement un corps en combustion, sa lumière et sa chaleur seraient assurément bientôt épuisées. En supposant qu'il fût un globe solide de charbon, sa combustion couvrirait au plus la dépense de 4 600 années. Il se consumerait lui-même dans ce temps relativement court. Quel agencement produit donc cette température si élevée et conserve au soleil son trop plein de chaleur ? Nous avons considéré le cas d'un corps tombant sur la terre d'une très-grande distance, et nous avons trouvé que la chaleur engendrée par son choc serait deux fois celle produite par la combustion d'un poids égal de charbon. Combien plus grande doit être la chaleur d'un corps qui tombe sur le soleil ? La vitesse maximum avec laquelle un corps peut

choquer la terre est d'environ 11 kilomètres; la vitesse maximum avec laquelle un corps peut choquer le soleil est de 630 kilomètres par seconde. Et comme la chaleur développée par le choc est proportionnelle au carré de la vitesse éteinte, un astéroïde tombant sur le soleil avec la vitesse maximum ci-dessus assignée, engendrerait une chaleur égale à dix mille fois celle que ferait naître la combustion d'un poids de charbon égal au poids de l'astéroïde.

Avons-nous quelque raison de croire que de semblables astéroïdes existent dans l'espace, et qu'ils puissent arriver à tomber sur le soleil, en constituant une sorte de pluie de pierres? Les météorites ou étoiles filantes qui éclatent dans l'air sont de petits corps planétaires déviés par l'attraction de la terre, et entrant dans notre atmosphère avec une vitesse planétaire. Par le frottement contre l'air, ils s'échauffent jusqu'à l'incandescence et deviennent une source de lumière et de chaleur [1]. Dans certaines saisons de l'année ils pleuvent en très-grand nombre. A Boston, on en a compté 240 000 en neuf heures. Nous n'avons aucun motif de supposer que le système planétaire est limité à de grandes masses de poids énormes; nous avons au contraire toute raison de croire que l'espace est peuplé de petites masses obéissant aux mêmes lois que les grandes. Cette enveloppe lenticulaire qui entoure le soleil, et que les astronomes désignent du nom de lumière zodiacale est probablement un amas de météores; et parce qu'ils se meuvent dans un milieu résistant, ils doivent s'approcher continuellement du soleil. En tombant sur lui, ils contribueraient à produire la chaleur observée, et ils constitueraient une source suffisante à réparer les pertes de chaleur subies annuellement par le soleil. Le soleil, dans cette hypothèse, deviendrait incessamment plus gros; mais de combien augmenterait son diamètre? Si notre lune venait à tomber sur le soleil, elle développerait une quantité de chaleur suffisante à couvrir les pertes d'une ou deux années; et si notre terre, à son tour, tombait sur le soleil, elle couvrirait les pertes d'un siècle. Cependant les masses réunies de la lune et de la terre, si elles étaient uniformément réparties à la surface du soleil disparaîtraient complétement. En réalité, la quantité de matière suffisante à produire l'approvisionnement du soleil en chaleur, pendant toute la durée des temps historiques, ne produirait pas d'augmentation appréciable du volume du soleil. L'accroissement de sa force attractive serait plus appréciable.

[1] Cette hypothèse a d'abord été émise par M. Joule, comme on l'a dit dans la première leçon.

Quoi qu'il en soit de cette hypothèse en tant que représentation des faits de la nature, elle montre réellement comment on peut former et maintenir un soleil par l'application des principes connus de la thermo-dynamique.

Notre terre se meut dans son orbite avec une vitesse de 109 440 kilomètres par heure. Si ce mouvement était arrêté ou éteint, il en résulterait une quantité de chaleur suffisante à élever de 384 000 degrés centigrades la température d'un globe de plomb de même volume que la terre. Il a été prophétisé par l'apôtre saint Pierre que les éléments seront dissous par le feu, « elementa ignis calore solventur. » Le seul mouvement de la terre comprend tout ce qui est nécessaire et suffisant à l'accomplissement de cette prophétie. Arrêtez subitement ce mouvement, et la plus grande portion, sinon la totalité de la masse de la terre, sera réduite en vapeur. Si la terre venait à tomber sur le soleil, la quantité de vapeur développée par le choc serait égale à celle engendrée par la combustion de 6 435 terres de charbon solide.

Il est une autre considération en relation avec la permanence des conditions actuelles de notre terre, et qui est très-digne d'attention. Debout sur l'un des ponts de Londres, nous remarquons que la direction du courant de la Tamise est renversée, et que l'eau remonte deux fois chaque jour. L'eau ainsi refoulée frotte contre le lit et les berges de la rivière, et ce frottement engendre de la chaleur. La chaleur ainsi engendrée est en partie rayonnée vers l'espace et perdue, en tant du moins qu'il s'agit de la terre. Par quoi cette perte incessante est-elle réparée? Par la rotation de la terre. Examinons cette question d'un peu plus près. Concevons que la lune soit fixe, et que la terre tourne comme une roue de l'ouest à l'est dans sa rotation diurne. Considérons une haute montagne à la surface de la terre; en approchant du méridien de la lune, cette montagne se comporte comme si elle était saisie par la lune et formait une sorte de manivelle, au moyen de laquelle la lune ferait tourner la terre plus rapidement autour de son axe. Lorsque la terre a passé le méridien de la lune, l'attraction de la lune sur la montagne s'exercera dans la direction opposée; elle tendra maintenant à diminuer la vitesse de rotation de la terre, comme antérieurement elle tendait à l'augmenter. Mais, si nous admettons que la montagne reste toujours à l'est du méridien de la lune, son attraction s'exercera toujours en sens contraire de la rotation de la terre, dont la vitesse diminuerait alors nécessairement d'une quantité proportionnelle à

l'intensité de l'attraction. L'onde soulevée qui constitue la marée occupe sans cesse cette position ; elle reste toujours à l'est du méridien de la lune, et, de cette manière, les eaux de l'Océan sont en partie traînées, comme un frein, le long de la surface de la terre ; et, comme un frein, elles doivent diminuer la vitesse de rotation de la terre. Cette diminution, quoique inévitable, est cependant trop petite pour avoir pu se faire sentir pendant la période à laquelle s'étendent nos observations sur ce sujet. Supposant donc que nous fassions tourner un moulin par l'action de la marée, et que nous produisions de la chaleur par le frottement des meules : cette chaleur aura une origine totalement différente de celle qui serait produite par un autre moulin que le torrent descendant d'une montagne ferait tourner. La première a été produite aux dépens de la rotation de la terre ; la seconde aux dépens de la radiation solaire.

Le soleil, par l'acte de la vaporisation, enlève mécaniquement toute l'humidité de notre atmosphère. Cette humidité se condense et tombe sous forme de pluie ; ou bien elle se refroidit davantage, et tombe sous forme de neige. Sous cette forme solide, elle s'entasse sur les sommets alpins, et fournit la matière des glaciers des Alpes. Mais le soleil intervient de nouveau ; il rend sa liberté à l'eau solidifiée, et lui permet de descendre à la mer par sa pesanteur. La force mécanique de chacune des rivières qui, sur le globe, coulent vers l'Océan, a son origine dans la chaleur solaire. Aucun petit ruisseau ne descend à un niveau inférieur sans avoir été d'abord élevé à la hauteur d'où il s'écoule par la puissante action du soleil. L'énergie des vents est aussi due entièrement au soleil; mais c'est de la part du soleil un tout autre travail, et il n'est pas aussi facile de le lui rattacher. Les arbres et les végétaux croissent sur la terre, et lorsqu'on les brûle, ils font naître de la chaleur directement, du pouvoir mécanique indirectement. D'où ce pouvoir dérive-t-il? Vous voyez cet oxyde de fer produit par la chute, les uns sur les autres, des atomes du fer et de l'oxygène ; voici, en outre, un gaz transparent que vous ne pouvez pas voir, le gaz acide carbonique, formé par la chute, les uns sur les autres, des atomes de l'oxygène et du charbon. Ces atomes ainsi enchaînés dans une union étroite ressemblent à notre poids de plomb tant qu'il reste à la surface de la terre. Mais, de même que je puis soulever le poids et le préparer pour une chute nouvelle, je puis aussi libérer ces atomes en les séparant les uns des autres, et les mettre à même de former de nouvelles combinaisons. Dans la formation des végétaux, l'acide carbonique est la matière d'où

dérive le carbone de la plante, et le rayon solaire est l'agent qui désunit les atomes, mettant l'oxygène en liberté, et permettant au carbone de se transformer en fibres ligneuses. Laissez les rayons du soleil tomber sur la surface du sable ; le sable est échauffé, et il rayonne finalement au dehors autant de chaleur qu'il en a reçu ; laissez ces mêmes rayons tomber sur une forêt, la quantité de chaleur sera moindre que celle qu'elle a reçue, parce que l'énergie d'une portion des rayons solaires est employée à faire croître les arbres de la manière qui a été indiquée. Sans l'intervention du soleil, la réduction de l'acide carbonique ne peut pas avoir lieu, et lorsqu'il est intervenu il a dépensé une quantité de lumière exactement équivalente au travail moléculaire effectué. C'est ainsi que sont formés les arbres, c'est ainsi qu'est né le coton que je tiens entre les doigts. J'y mets le feu, il s'enflamme, l'oxygène s'unit de nouveau à son cher carbone ; et sa combustion fait naître une quantité de chaleur égale à celle que le soleil avait perdue pour le faire végéter.

Mais pourquoi nous arrêter à la vie végétale, surtout lorsqu'elle est la source médiate ou immédiate de la vie animale ? Le soleil sépare le carbone de son oxygène ; l'animal consomme le végétal ainsi formé ; dans ses artères, la combinaison des éléments séparés se refait de nouveau, et cette combinaison engendre la chaleur animale. Ainsi, à parler rigoureusement, la croissance des végétaux a pour point de départ une décomposition ; la croissance des animaux a pour source immédiate une combinaison. La chaleur de nos corps et tous les efforts mécaniques que nous exerçons descendent en ligne directe du soleil. La lutte de deux boxeurs, les mouvements d'une armée, l'élévation de son propre corps sur les pentes des montagnes par un touriste alpin, sont également des cas d'énergie mécanique dérivée du soleil. C'est ainsi, par conséquent, que nous sommes, non plus dans un sens poétique, mais dans un sens purement mécanique des enfants du soleil. Sans les aliments nous serions tristement réduits à oxyder nos propres corps. L'homme qui pèse 75 kilogrammes a 32 kilogrammes de muscles : mais ces muscles, à l'état de siccité, ne pèsent plus que 7 kilogrammes et demi. Cette masse de muscles serait complétement oxydée par quatre-vingts journées de travail ordinaire. Les organes spéciaux qui ont plus à faire seraient oxydés plus tôt ; le cœur, par exemple, s'il ne recevait aucune alimentation, serait entièrement oxydé en une semaine. Prenez la quantité de chaleur due à l'oxydation directe d'une quantité donnée d'aliments, elle sera plus grande que la quantité de chaleur développée par la combustion de

ces mêmes aliments dans le travail de la machine animale, et la différence ou la perte est l'équivalent exact du travail mécanique exécuté par le corps de l'animal.

Je pourrais étendre ces considérations; il me suffirait d'ouvrir la main pour qu'il en sortît des aperçus nouveaux; mais on m'avertit que je vous ai déjà entretenus trop longtemps. A qui devons-nous les généralisations si frappantes qu'il m'a été donné de développer ce soir? Tout ce que vous avez entendu est l'œuvre d'un homme que vous connaissez à peine de nom; oui, tout ce que je vous ai présenté est extrait des mémoires d'un médecin allemand appelé M. Mayer. Sans stimulant extérieur, et pendant qu'il exerçait sa profession à Heilbronn, cet homme a, le premier, su rendre claire pour son esprit la corrélation des forces naturelles. Cependant son nom est très-rarement prononcé dans les cours de physique, et son mérite n'est qu'imparfaitement connu des savants. Conduit par ses propres et belles recherches, indépendantes de celles de M. Mayer, M. Joule publia en 1843 son premier mémoire sur la valeur mécanique de la chaleur; mais, déjà en 1842, M. Mayer avait effectivement calculé l'équivalent mécanique de la chaleur, en partant de données qu'un homme d'une originalité d'esprit rare pouvait seul mettre en jeu. Pour déduire l'équivalent mécanique de la chaleur, il était parti de la vitesse du son dans l'air. Il publia en 1845 son mémoire sur le mouvement organique, et appliqua la théorie mécanique de la chaleur à l'énergie vitale, de la manière la plus audacieuse et la plus précise. Il embrassa aussi les autres agents naturels dans sa chaîne de conservation. En 1853, M. Waterston proposa, indépendamment, la théorie météorique de la chaleur solaire; et, en 1855, M. le professeur William Thomson appliqua son admirable puissance mathématique au développement de cette théorie; mais, six ans auparavant, cette même matière avait été traitée d'une manière magistrale par M. Mayer, et tout ce que j'en ai dit vient de lui. Si nous considérons les circonstances de sa vie et l'époque à laquelle il écrivait, nous ne pouvons manquer d'être frappés d'étonnement en voyant ce qu'il a accompli. C'était un homme de génie, travaillant en silence, animé seulement par l'amour du sujet adopté par lui, et arrivant aux plus importants résultats bien avant ceux dont la vie est entièrement consacrée à la philosophie naturelle. Ce fut le singulier accident d'une saignée faite à un fiévreux, à Java, en 1840, qui conduisit M. Mayer à ces spéculations transcendantes. Il remarqua que le sang veineux, dans les chaudes régions des tropiques, est d'un rouge beaucoup plus brillant que dans les régions plus froides; et les rai-

sonnements qu'il fit sur ce fait l'introduisirent dans le laboratoire des forces naturelles, où il a travaillé avec tant d'habileté et de succès. Vous désirez sans doute savoir ce qu'il est devenu : sa raison l'abandonna ; il devint fou et fut enfermé dans une maison d'aliénés. Il est dit, dans un dictionnaire biographique allemand, qu'il y mourut, mais c'est inexact : il a recouvré sa raison, et il est actuellement, je le crois, propriétaire de vignes à Heilbronn.

Pendant que je préparais l'impression de mes dernières leçons sur la chaleur, j'ai éprouvé le désir de me mettre au courant de tout ce que M. Mayer a publié sur la théorie mécanique de la chaleur. J'ai écrit, en conséquence, à deux savants qui, plus que tous les autres, me semblaient être à même de me donner les renseignements dont j'avais besoin. Tous les deux sont Allemands, et tous deux se sont particulièrement distingués en traitant le même sujet. Chacun m'a adressé la liste des publications de M. Mayer, et l'un a été assez aimable pour donner à un libraire l'ordre de me les expédier. Cet ami, en répondant à ma première lettre relative à M. Mayer, exprimait l'opinion que je ne trouverais rien de vraiment important dans les écrits du docteur de Heilbronn. Mais, avant de m'adresser les mémoires, il lui prit envie de les lire ; et, dans sa seconde lettre, celle qui accompagnait l'envoi, il me disait en propres termes : « Je dois rétracter l'opinion exprimée dans ma première lettre, que vous ne trouveriez rien d'important dans les écrits de M. Mayer : je suis étonné de la multitude de pensées belles et correctes qu'ils contiennent. » Puis il continuait à énumérer les diverses questions importantes dans la discussion desquelles Mayer avait précédé des écrivains éminents. Mon second ami, dans les publications duquel le nom de M. Mayer revient souvent, et, dont les mémoires, contenant les renvois à M. Mayer, ont été traduits par moi il y a quelques années, ne connaissait pas encore, à l'époque du 10 mai, l'essai si beau et si plein d'idées que M. Mayer a intitulé : *Introduction à la dynamique du ciel*; et, en 1854, lorsque M. le professeur William Thomson développait d'une manière si frappante la théorie météorique de la chaleur solaire, il ne soupçonnait certainement pas l'existence de cet essai, quoique je doive inférer d'un article récent du *Macmillan's Magazine*, qu'il la connaît actuellement. Les écrits physiologiques de M. Mayer ont été cités par plusieurs physiologistes, par M. le docteur Carpenter, par exemple, dans des termes qui prouvent qu'ils en font grand cas. En résumé, les physiciens et les physiologistes ont partiellement éclairé de quelques lueurs le front de M. Mayer; mais jusqu'ici son mérite n'a certainement pas été autant re-

connu qu'il l'aurait été s'il avait choisi un mode de publication plus heureux. Je ne crois pas que l'on puisse rendre un plus mauvais s - vice à un écrivain que d'exagérer son mérite et ses droits ; de semblables exagérations produisent un effet certain de répulsion, au grand désavantage de ceux au profit desquels on croit les faire. Mais, lorsqu'on fera entrer en ligne de compte l'époque à laquelle écrivait M. Mayer, ce qu'il a fait et le sort qu'il a subi, je ne pense pas qu'on ait le courage de me reprocher d'avoir tenté de lui faire reprendre la place honorable que je crois lui être due. En attendant, voici le titre de ses mémoires, afin que chacun en les lisant puisse corriger les erreurs de jugement dans lesquelles j'aurais pu tomber au sujet de leur auteur.

Bemerkungen über die Kræfte der unbelebten Natur; Remarques sur les forces de la nature inanimée. *Liebig's Annalen*, 1852, vol. XLII, p. 231 ; *Die organische Bewegung in ihrem Zusammenhange mit dem Stoffwechsel*; Le mouvement organique dans sa dépendance du changement de matière. Heilbronn, 1845; *Beitræge zur Dynamik des Himmels;* introduction à la mécanique du ciel. Heilbronn, 1848.— *Bemerkungen über das mechanische Aequivalent der Waerme;* Remarques sur l'équivalent mécanique de la Chaleur. Heilbronn, 1851.

A l'occasion de cette leçon, M. Joule a adressé aux éditeurs du *Philosophical magazine* la lettre suivante :

NOTE SUR L'HISTOIRE DE LA THÉORIE DYNAMIQUE DE LA CHALEUR

Permettez-moi de soumettre à vos lecteurs quelques remarques sur le sujet que mon ami, M. Tyndall, a traité dans sa leçon à Royal institution. Il a eu pour but, dans cette leçon, de renforcer les droits de priorité de M. Mayer, un philosophe dont le mérite a été négligé par quelques-uns des physiciens anglais, et certainement aussi par ses compatriotes. Moi-même je n'étais que très-imparfaitement initié à ses publications, lorsque, de bonne foi et avec les matériaux à ma disposition, je traçai une esquisse de l'histoire de la théorie dynamique de la Chaleur, dans mon mémoire imprimé aux *transactions philosophiques* de 1850. Le mérite de M. Mayer consiste à avoir énoncé, en apparence sans connaissance de ce qui avait été fait avant lui, la véritable théorie de la chaleur. Ce n'est pas un petit mérite, et je serai le

dernier à le rabaisser. Toutefois, accorder à M. Mayer, ou de fait à un seul individu, la gloire indivise d'avoir formulé la Théorie dynamique de la Chaleur, ce serait commettre une injustice manifeste à l'égard de ceux qui, en grand nombre, ont contribué à faire faire ce grand pas aux sciences physiques. Il y a deux siècles, Locke disait : « La chaleur est une agitation très-vive des parties insensibles de l'objet, qui produit en nous la sensation par laquelle nous déclarons l'objet chaud; de sorte que ce qui dans notre sensation est chaleur, n'est dans l'objet que mouvement. »

En 1798, Rumford, cherchant à découvrir la source de la chaleur qui se dégage dans le forage des canons, faisait observer qu'il « est extrêmement difficile, sinon totalement impossible, de se former une idée distincte de quoi que ce soit capable de pouvoir être excité et communiqué, de la manière dont la chaleur est excitée et communiquée, comme cela a lieu dans les expériences, à l'exception du mouvement. » En 1812, Davy a écrit : « La cause immédiate des phénomènes de chaleur est dans le mouvement; et les lois de sa communication sont précisément les mêmes que les lois de la communication du mouvement[1]. » (*Eléments de philosophie chimique*, p. 94.) Et en confirmation de ces vues, il apportait l'expérience très-originale et très-intéressante de la fusion de la glace par le frottement[2]. En 1839 M. Marc Seguin publiait un ouvrage intitulé : *De l'Influence des chemins de fer*. Il y montrait que la théorie généralement adoptée conduirait à cette conclusion absurde, qu'une quantité finie de chaleur produirait une quantité indéfinie d'action mécanique, et ajoutait, page 328 : « Il me paraît plus naturel de supposer qu'une certaine quantité de calorique disparaît dans l'acte même de la production de la force ou puissance mécanique, et réciproquement. » Et page 383 : « La force mécanique qui apparaît pendant l'abaissement de température d'un gaz, comme de tout autre corps qui se dilate, est la mesure et la représentation de cette diminution de chaleur. » A la page 389, il donne une table de la quantité d'effet mécanique produit, correspondante à la perte de température de la vapeur dans son expansion. D'où il apparait qu'un degré centigrade correspond à 365 kilogrammes élevés à la hauteur d'un mètre. A la page 403, il dit encore : « Je bornerai là mes réflexions sur ce sujet, dont chacun saura apprécier l'importance. Du calorique qui est employé par l'in-

[1] *Éléments de philosophie chimique*, p. 94.

[2] Mes leçons du matin ont rendu tout ceci familier. — J. T.

dustrie à produire de la force et aux usages domestiques, une faible partie seulement est utilisée; une autre quantité beaucoup plus considérable, et qui pourrait suffire à créer d'immenses valeurs et à augmenter d'autant la richesse nationale, se trouve absolument perdue.»

Ces divers essais suffisent à prouver que de grands pas avaient été faits avant que M. Mayer écrivît son mémoire de 1842. M. Mayer discute la même question que M. Seguin, mais plus longuement, avec plus de perspicacité et avec une plus grande abondance d'explications. Il adopte la même hypothèse que le dernier savant, c'est-à-dire que la chaleur développée par la compression d'un fluide élastique est l'équivalent exact de la force comprimante; et il arrive ainsi à ce même équivalent, 365 kilogrammes pour un degré centigrade.

Il faut remarquer qu'à l'époque où MM. Seguin et Mayer écrivaient on ne connaissait encore aucun fait qui vînt à l'appui de cette hypothèse. Il n'y avait aucune raison d'affirmer que la chaleur développée par la compression d'un gaz fût même approximativement l'équivalent de la force comprimante. Et c'est par cette absence de tout fait positif qu'on peut expliquer l'inattention avec laquelle le monde savant a accueilli ces écrits. La théorie dynamique de la chaleur n'était certainement pas établie par MM. Seguin et Mayer. Pour qu'elle le fût, il fallait des expériences; et par conséquent j'ose maintenir sans crainte mes droits à la position que mes confrères les physiciens m'ont généralement accordée, pour avoir donné le premier une preuve décisive de l'exactitude de cette théorie.

En parlant ainsi, je n'ai aucune prétention au monopole du mérite; alors même que Rumford, et MM. Mayer et Seguin n'auraient pas écrit leurs ouvrages, la justice ne me ferait pas moins un devoir de partager, avec MM. Thomson, Rankine, Helmholtz, Holtzmann[1], Clausius et autres, dont les travaux ont non-seulement servi efficacement au développement et aux applications de la théorie dynamique, mais qui ont contribué efficacement, par des preuves nouvelles, à lui donner plus de certitude, et qui ont droit, par conséquent, comme leurs prédécesseurs, à leur part de mérite dans cette voie de recherches nouvelles.

Permettez-moi de faire remarquer, en finissant, que j'ai appliqué la théorie dynamique aux phénomènes vitaux en 1843[2]; qu'en 1847,

[1] Le nom de ce savant doit être ajouté à ceux qui sont mentionnés dans la préface, comme les fondateurs de la théorie dynamique de la chaleur. — J. T.

[2] *Phil. Mag.*, § 3, vol. XXIII, p. 442.

dans une leçon populaire, publiée par *le Courrier* de Manchester, j'expliquais le phénomène des étoiles filantes, et j'ajoutais que l'effet de la chute de la terre sur le soleil serait d'augmenter la température de notre grand luminaire [1]. Depuis cette époque, M. Thomson, par ses investigations profondes, a fait sienne la théorie dynamique de la chaleur en tant qu'appliquée aux phénomènes cosmiques.

J'ai la confiance que, par les remarques qui précèdent, je n'ai fait aucune injustice à M. Mayer ; j'aime à me le persuader, d'autant plus que j'ai appris, avec un profond chagrin, qu'une maladie grave l'a éloigné (espérons que ce sera pour très-peu de temps) de la science, au progrès de laquelle il a travaillé avec tant d'habileté. La reproduction dans le *Philosophical Magazine* de quelques-uns de ses mémoires, en particulier du *Mémoire sur les forces de la nature organique*, intéresserait, j'en suis sûr, beaucoup de vos lecteurs, et les mettrait à même d'apprécier, à leur juste valeur, ses droits incontestables.

J'étais en Suisse quand cette lettre parut, et, immédiatement après mon retour, je publiai cette réponse à M. Joule (*Philosoph. Mag.*, sept. 1862).

Mon cher Joule,

A mon retour de Suisse, il y a deux jours, j'ai eu connaissance de la note que vous avez fait publier dans le dernier numéro du *Philosophical Magazine*. Veuillez me permettre les remarques suivantes sur le sujet dont elle traite :

Pendant le printemps de la présente année j'ai donné, à l'Institution royale, une suite de leçons *sur la chaleur, considérée comme une sorte de mouvement*. Pendant la première partie du cours, j'avais engagé un sténographe à prendre mes leçons, dans le dessein de les publier plus tard ; or, j'extrais du manuscrit de ce sténographe le passage suivant de ma seconde leçon sur la théorie mécanique de la chaleur :

« C'est à M. Joule, de Manchester, que nous devons presque toutes les recherches expérimentales sur ce sujet. L'esprit fortement arrêté

[1] *Phil. Mag.*, vol. XXXII, p. 350, et *Manchester Courier*, 12 may 1847.

sur un principe fécond, et sans se laisser décourager par l'accueil si froid que semblent avoir reçu ses premiers travaux, il a poursuivi pendant des années entières ses essais de démonstration de l'invariabilité du rapport entre la chaleur et la force mécanique ordinaire. Il versa de l'eau dans un récipient convenable, l'agita avec des palettes mises en mouvement par des forces d'intensité connue, et détermina l'élévation de température; il fit la même chose avec du mercure et d l'huile de baleine. Il fit aussi rouler l'un sur l'autre deux disques de fonte, et mesura la chaleur produite par leur frottement. Il força l'eau à passer par des tubes capillaires et mesura encore la chaleur engendrée. Les résultats de ses expériences ne laissent aucun doute dans l'esprit ; ils démontrent que dans toutes ces circonstances la chaleur produite par la dépense d'une quantité déterminée de force mécanique est fixe et invariable. » Tel est le langage que j'ai tenu relativement à vous; et je le maintiens toujours. Il me semble que vous n'y trouverez rien qui indique un désir quelconque de ma part de remettre en question vos droits à l'honneur d'avoir le premier démontré expérimentalement l'équivalence mécanique de la chaleur et du travail.

Je n'avais pas, dans la leçon à laquelle vous faites allusion, à faire l'histoire de la théorie mécanique de la chaleur, mais simplement à faire à un homme de génie, à qui le sort a été singulièrement défavorable, une situation à peu près digne de lui. Je connaissais parfaitement tout ce que vous avez cité de Locke, de Rumford, de Davy et d'autres; vous auriez pu ajouter Bacon à votre liste. Jamais, probablement, une grande synthèse n'a été formulée sans qu'elle ait d'abord germé dans les esprits de beaucoup de penseurs. Mais les écrits de M. Mayer font époque dans l'histoire de cette grande question, et je ne me sens certainement pas disposé à rétracter une seule des opinions que j'ai émises en sa faveur. Je crois, au contraire, qu'il mérite plus d'éloges que je ne lui en ai donnés. C'est lui qui le premier s'est servi du terme *équivalent* dans le sens précis que vous lui avez laissé; il a déduit, par le calcul, l'équivalent mécanique de la chaleur de données *qu'un homme éminemment ingénieux* pouvait songer seul, comme je l'ai dit, à mettre en jeu ; et son calcul offre un accord frappant avec vos propres déterminations expérimentales[1]. Vous avez travaillé d'une manière indépendante de M. Mayer et dans une voie entièrement diffé-

[1] En faisant usage de la chaleur spécifique de l'air corrigée.

rente. Vous avez soumis la théorie mécanique à l'épreuve de l'expérience, et vous en avez ainsi prouvé la vérité.

M. Mayer a calculé exactement l'équivalent mécanique de la chaleur ; mais vous dites que, au temps où il écrivait, aucun fait donné ne garantissait l'hypothèse qu'il adoptait. Si, par là, vous voulez dire qu'il est parti d'une conjecture tout à fait hasardée, sans aucune base physique probable, je ne puis pas être d'accord avec vous. La constitution connue d'un fluide élastique est, dans mon opinion, tout à fait suffisante pour justifier la manière de procéder de M. Mayer. Son hypothèse était celle-ci : Soit x la quantité de chaleur requise pour élever à t_0 la température d'un gaz maintenu *sous volume constant*, et soit $x + y$ la chaleur requise pour élever à t_0 le même gaz, sous *pression constante*. Le poids soulevé par le gaz en se dilatant dans le dernier cas étant P, et la hauteur à laquelle il est élevé étant h, on aura nécessairement, selon Mayer,

$$y = P \times h;$$

c'est-à-dire que l'excès de chaleur communiqué dans le dernier cas est précisément équivalent au travail mécanique exécuté.

Cette équation suppose, sans aucun doute, que la quantité de chaleur y est dépensée tout entière en travail *extérieur*, et que rien n'en a été employé à vaincre les attractions moléculaires. Or cette hypothèse est, à première vue, extrêmement probable, si probable, en effet, qu'elle est pour moi presque la certitude. M. Clausius fait la même supposition sans y être plus autorisé que M. Mayer; et je crois (car ici je m'en rapporte seulement à ma mémoire) qu'elle a été complétement vérifiée par les expériences des vrais savants qui l'ont mise à l'épreuve. « La loi *chaleur = effet mécanique*, est, dit M. Mayer, indépendante de la nature du fluide élastique, qui n'est que l'instrument à l'aide duquel une force est convertie en l'autre. »

La loi de Mariotte était un vieux principe quand M. Mayer écrivait; et le fait qu'elle est vraie pour les gaz, en général, rend extrêmement probable cette conclusion que, pendant qu'elles cèdent à la compression, les attractions des molécules gazeuses sont insensibles : autrement il serait très-difficile de concevoir qu'on ait pu obtenir les mêmes résultats avec des gaz si diversement constitués ; les attractions des atomes d'hydrogène, par exemple, seraient, selon toute probabilité, très-différentes de celles de l'oxygène. L'hypothèse de M. Mayer, relative à l'absence de travail intérieur dans un gaz permanent, a été

justifiée plus tard par les expériences d'Œrsted et de Despretz, qui ont fait voir que les gaz liquéfiables s'écartaient de la loi de Mariotte; l'écart étant d'autant plus grand que le gaz est plus près de son point de liquéfaction. Dès lors, donc, qu'on n'avait signalé aucun écart de la loi, dans le cas de l'air, par exemple, M. Mayer, il me semble, était parfaitement en droit d'admettre que les attractions moléculaires étaient insensibles, que la quantité de chaleur y dont il a été question plus haut était entièrement dépensée à élever le poids, et qu'elle avait son véritable équivalent mécanique dans le poids ainsi élevé.

Relativement à l'application de la théorie mécanique de la chaleur aux phénomènes cosmiques, je prendrai la liberté de vous demander si vous avez jamais lu l'essai de M. Mayer intitulé : *Beiträge zur Dynamik des Himmels?* Si vous l'avez lu, j'aurais de graves raisons de suspecter ma compétence, et de désespérer d'arriver jamais à une conclusion exacte sur ce qui constitue un droit scientifique.

Sachant que les mémoires originaux de M. Mayer seront la vraie cour d'appel dans la controverse actuelle, j'ai pressé, il y a quelques mois, l'éditeur responsable du *Philosophical Magazine* d'en publier la traduction. J'espère qu'il le fera; et je suis entièrement d'accord avec vous en pensant qu'ils intéresseront bien des lecteurs. Laissez-moi ajouter, en terminant, qu'à mon avis, l'estime généralement décernée à vos travaux ne peut souffrir en rien de la reconnaissance accordée à M. Mayer. Il y a assez de place pour vous deux sur ce grand théâtre. Pour mon compte, bien certainement, alors même que M. Mayer n'aurait jamais écrit une ligne sur la théorie mécanique de la chaleur, je ne jugerais pas votre travail plus excellent que je ne l'estime à présent.

Croyez-moi votre, etc.,

JOHN TYNDALL.

Le public est maintenant en possession de tout ce que j'ai écrit relativement aux droits de priorité du docteur M. Mayer. Tout étant ainsi réuni, il sera plus facile de se former une opinion raisonnée.

FIN

TABLE ALPHABÉTIQUE

A

D

F

G

M

N

O

P

Q

R

S

T

V

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE

ERRATA

Page	4	ligne	5	*au lieu de*	cuivre	*lisez*	mica.
—	7	—	33	—	la	—	une.
—	7	—	9	—	évidemment	—	en apparence.
—	19	—	13	—	sur la route	—	sur les chemins.
—	24	—	10	—	quoiqu'ils connussent	—	mais ils connaissaient.
—	36	—	9	—	la distance	—	l'espace.
—	36	—	12	—	oscillation	—	mouvement.
—	45	—	12	—	1 600	—	1 500.
—	49	—	13	—	la subtilité et la mobilité	—	la mobilité.
—	61	—	27	—	d'au moins 100 mètres	—	de quelques centaines de mètres.
—	69	—	31	—	proposée	—	suivie.
—	80	—	17	—	cuivre	—	laiton.
—	85	—	36	—	diminuer de volume	—	se raccourcir.
—	100	—	2	—	un grand	—	quelque.
—	105	—	12	—	conduisent à une conséquence.	—	se lient à un résultat.
—	106	—	6	—	Haendel	—	Handel.
—	117	—	29	—	Iökulls	—	Jökulls.
—	225	—	17	—	Walrus	—	Morse.
—	233	—	4	—	force	—	force motrice.
—	234	—	30	—	miroir	—	miroir L.
—	238	—	8	—	trois mètres	—	1 mètre 50.
—	265	—	14-15	—	12 millimètres	—	1 millimètre.
—	267	—	37	—	successions	—	accumulations.
—	277	—	titre	—	entre	—	avec.
—	306	—	34	—	unique	—	optique.
—	318	—	13	—	leur	—	le.
—	321	—	7 et 10	—	V	—	U.
—	330	—	21	—	6°	—	60°
—	332	—	24	—	50me	—	50me de pouce cube.
—	342	—	36	—	pourquoi	—	elle signifie
—	343	—	4	—	est-il	—	est.
—	349	—	3	—	éther	—	éther boracique.
—	333	—	32	—	1^m50	—	50 centimètres.

PARIS. — IMP. SIMON RAÇON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

EXTRAIT DU CATALOGUE

DE LA

LIBRAIRIE D'ÉTIENNE GIRAUD, ÉDITEUR

20, rue Saint-Sulpice, à Paris.

IMPOSSIBILITÉ DU NOMBRE INFINI et ses conséquences. Démonstration mathématique du dogme de la Création et de la récente apparition de l'homme sur la terre, par M. L'ABBÉ MOIGNO, rédacteur des Mondes, in-8, br. . . . . 50 c.

OPTIQUE MATHÉMATIQUE (la diffraction de la lumière), par E. BACALOGLO, in-8, br. . . . . 1 fr. 80

ΒΙΒΛΙΟΤΑΞΙΣ. Extrait d'un mémoire présenté à l'Académie des inscriptions et belles-lettres, par D. HONORÉ GARRONI DORIA, bibliothécaire au château de Brunsée, in-8. . . . . 50 c.

INTERPRÉTATION NATURELLE DES PIERRES ET DES OS, travaillés par les habitants primitifs des Gaules, par le docteur EUG. ROBERT, in-8, br. . . . . 1 fr. 25

AGE PRÉSUMABLE DES MONUMENTS CELTIQUES, établi d'après les monuments de même nature dont il est principalement fait mention dans la Bible, faisant suite à l'interprétation naturelle des pierres et des os travaillés par les habitants primitifs des Gaules, par le docteur EUG. ROBERT, in-8, br. . . . . 1 fr. 25

THÉORIE DE LA MUSIQUE, déduite de la considération des nombres relatifs de vibrations, par M. D. DELOCHE, ancien élève de l'École Normale, agrégé des sciences, ancien recteur, inspecteur d'académie, chevalier de la Légion d'honneur, 1 vol. in-8. . . . . 5 fr.

NOTE SUR UNE FERME dans l'ancien lac de Harlem, par M. RENÉ DELOCHE, ingénieur des ponts et chaussées, in-8 avec une pl. . 1 fr. 75

ANALYSE D'UN MÉMOIRE DE M. NICOLAIDÈS sur le mouvement d'une figure plane dans son plan, par M. L'ABBÉ MOIGNO, in-8, br. 1 fr. 50

Cette analyse est suivie de diverses notes de M. Nicolaïdès sur les lieux des intersections des courbes tournantes autour des centres sur un plan.

TRAITÉ DE PHOTOGRAPHIE MICROSCOPIQUE, par DAGRON. 1re partie. Appareils et accessoires avec dessins et légendes. — 2e partie. Pratique et manière d'opérer, in-18 jésus. . . . . . . 1 fr. 50

NOUVELLE TABLE POUR LA VAPEUR D'EAU SATURÉE DU

PROFESSEUR GUSTAVE ZEUNER, traduit de l'Allemand, par M. A. Lucchesini, ingénieur civil, grand in-8. . . . . 1 fr. 25

NOUVELLE THÉORIE DE LA GRÊLE, par le R. P. J. M. Sanna Solaro, de la Compagnie de Jésus, grand in-8 avec une pl. 1 fr. 50

APPLICATION DE LA THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR au compresseur hydraulique du tunnel des Alpes, par M. A. Cazin, grand in-8. . . . . 1 fr. 25

NOUVEAUX APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES de M. Bertsch, pour l'agrandissement et le stéréoscope, in-8 avec 7 figures. . . 1 fr.

LES MONDES

REVUE HEBDOMADAIRE DES SCIENCES ET DE LEURS APPLICATIONS AUX ARTS ET A L'INDUSTRIE

PAR

M. L'ABBÉ MOIGNO

PARAISSANT TOUS LES JEUDIS, PAR LIVRAISONS DE 48 PAGES GRAND IN-8° AVEC FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE. — 2e ANNÉE.

Prix des abonnements à la revue LES MONDES :

UN AN :	Paris.	25 fr.
	Départements.	30
	Étranger.	32
	Rome et pays d'outre-mer.	45

Les abonnements partent du 1er *janvier.* — On s'abonne à Paris, au bureau de la Revue, rue Saint-Sulpice, 20, en province et à l'étranger, chez tous les directeurs de poste, dans les bureaux des messageries et chez tous les libraires.

Toute demande d'abonnement, faite directement au bureau de la Revue, doit être accompagnée d'un bon sur la poste ou d'un mandat à vue sur Paris, à l'ordre de M. Etienne Giraud, libraire-éditeur, 20, rue Saint-Sulpice.

Ce nouveau Recueil, que dirige M. l'abbé Moigno, si connu du monde savant, mérite à tous les points de vue la faveur de ceux qui désirent suivre de près et dans tous ses détails théoriques et pratiques le grand mouvement scientifique dont notre siècle est témoin : nous croyons même qu'il est indispensable à quiconque, par position ou par besoin, désire être initié à ce grand mouvement.

PARIS. — IMP. SIMON RACON ET COMP., RUE D'ERFURTH, 1.

